7. Меклер М.Б. Набивные виброштампованные сваи/ Меклер М.Б. - М.:Стройиздат, 1971. - 30 с.
8. Бахолдин Б.В., Современные конструкции свай и ростверков/ Бахолдин Б.В., Светличный Е.В.,Остров В.Н. - М.: ЦНТИС, 1973. - 73с.
9. Кузнецов С.В. Изготовление бетонных труб кольцевым рабочим органом/ Кузнецов С.В //Повышение эффективности использования машин в строительстве: Межвуз.науч. сб. ЛИСИ..-Л, 1984.-С.56-64.
10. Пустотелые буронабивные сваи. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.drillings.su/svai-obol.html.
11. Вандоловский А.Г. Послойное прессование — метод формирования особоплотной структуры мелкозернистого бетона/ Вандоловский А.Г. // Науковий вісник будівництва. - Харків.: ХОТВ АБУ, 1997,- Вип. 42. - с.26-32.
12. Вандоловский А.Г, Бетонные трубы повышенной прочности. Автореф.дис... д-р техн. наук, Харьков. ХИСИ, 1992,- 40 с.
13. Барский Б.Л. Трубчатые прессованные сваи/ Барский Б.Л., Вандоловский А.Г., Черниговский В.А // Строительство трубопроводов.- 1991,-2.С.32-34.
14. Изготовление полых буронабивных свай прессованием/ Бабушкин В.И., Вандоловский А.Г., Черниговский В.А., Чикишев В.М // Строительство трубопроводов.- 1991,- №6.-С.
15. Рачковський О.В. Удосконалення технології виробництва бетонних елементів різної номенклатури для систем каналізації: Автореф.дис....канд.тех.наук.ХДТУБА/-Харків, 1997.-24с.
16. Бурлака О.О. Підвищення міцністних і фільтраційних показників дренажних труб з пористого бетону. Автореф. дис.... канд. тех. наук ХДТУБА.- Харків,2013.-18с.

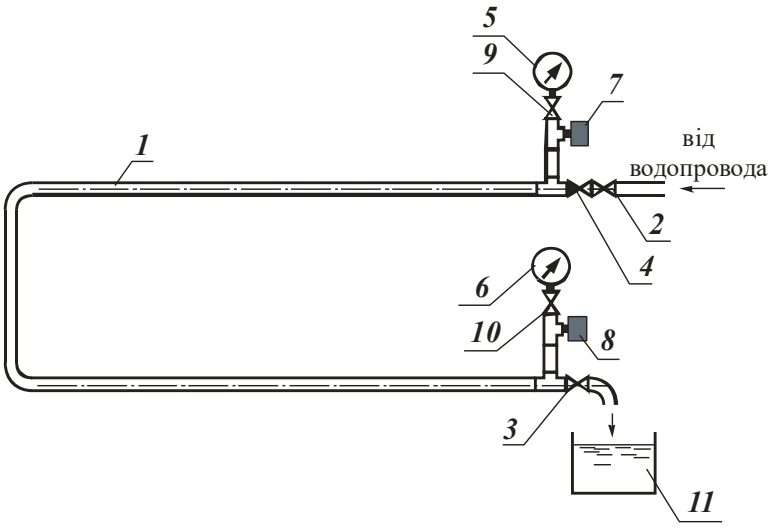
УДК 532.50

Колотило М.І, Рязанцев О.І.
Харківський національний університет будівництва та архітектури

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО УДАРУ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ ІЗ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

Порядок проведення дослідів та експериментальна установка описані у [1]. Схема установки наведена на рис. 1.

Як вказано у [1] протягом кожного досліду фіксувалися значення тисків на початку та в кінці трубопроводу за допомогою датчиків тиску (7, 8) і фіксувалися в цифровому вигляді комп'ютером. За отриманими даними побудовані графіки зміни тиску в часі для кожного досліду, характерний вигляд яких наведено на рисунках 2, 3.



1 – трубопровід, 2, 3, 9, 10 – крани, 4 – зворотний клапан, 5, 6 – механічні манометри, 7,8 – датчики тиску (манометри автономні ЛТМА01), 11 – мірна ємність об'ємом 15 л.
Рис. 1 – Схема дослідної установки.

Ці графіки побудовані для випадку швидкого закривання крана 3 в кінці трубопроводу та побудовані на підставі даних, які були отримані у ході проведення експерименту №9. На рис. 2 показано загальний характер змінення тиску під час проведення досліду, а на рисунку 3 у збільшеному масштабі показано зміну тиску у проміжок часу, коли спостерігались значні коливання тиску, що фіксувався автономними манометрами на початку та в кінці трубопроводу.

У табл. 1 наведені результати вимірювань і деякі результати обробки та аналізу отриманих діаграм змінення тиску.

Як видно з рис. 2, суттєве коливання тиску в трубопроводі спостерігається в інтервалі 0,2 – 0,3 секунд. За цей час відбувається 6 – 7 повних коливань. На рис. 3 показані характерні точки діаграми числові показники яких були використані при складанні табл. 1.

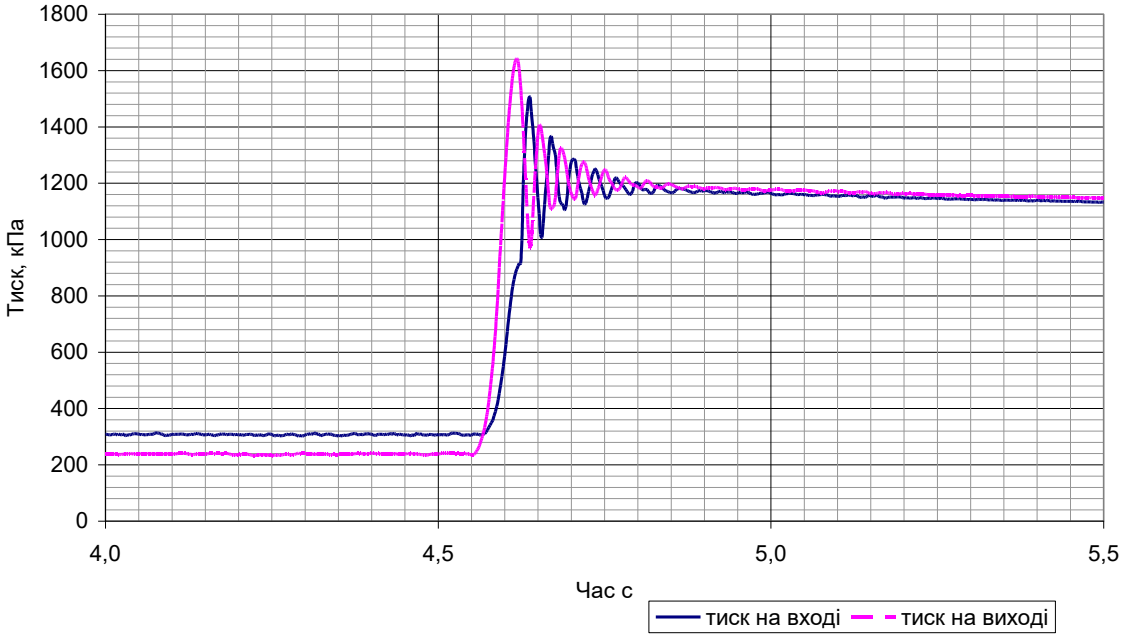


Рис. 2. Змінення тиску при гідравлічному ударі. Експеримент №9.

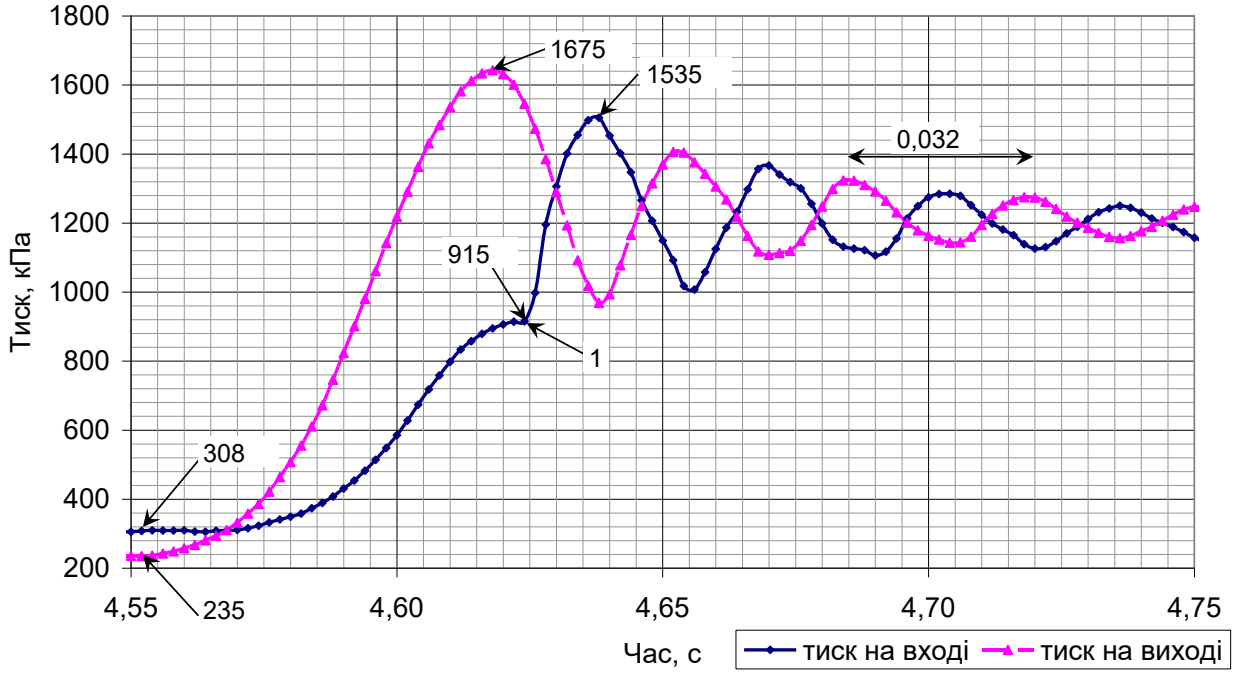


Рис. 3. Змінення тиску при гідравлічному ударі в межах проміжку часу де спостерігається суттєве коливання тиску

Таблиця 1 – Результати експериментів дослідження гідравлічного удару в поліпропіленовій трубі діаметром 20 мм

№№ експериментів	Показання манометра 5, кПа	Час наповнення мірної посудини, с	Витрата л/с	Швидкість руху води в трубопроводі, м/с	Показання датчиків до гідравлічного удару (робочий тиск), кПа		Максимальний тиск при гідравлічному ударі, кПа		Втрати напору, м	
					датчик 7	датчик 8	датчик 7	датчик 8	фактичні	розрахункові
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	162	29,16	0,514	3,160	160,6	19,0	1424,2	1606,4	14,434	8,483
2	200	31,78	0,472	2,900	197,9	79,1	2249,7	2453,3	12,110	7,276
3	250	36,38	0,412	2,533	244,2	149,1	2108,3	2296,2	9,694	5,713
4	300	42,81	0,350	2,153	294,1	227,8	1870,7	2045,5	6,758	4,273
5	350	54,19	0,277	1,701	343,3	300,0	1456,2	1589,3	4,414	2,805
6	400	76,97	0,195	1,197	408,4	389,7	1308,9	1431,8	1,906	1,498
7	435	114,31	0,131	0,806	433,3	425,2	1059,7	1136	0,826	0,740
8	165	28,81	0,521	3,199	162,4	19,0	996,1	232,3	14,618	8,671
9	300	42,62	0,352	2,162	312,5	242,0	1534,4	1674,6	7,187	4,305

Слід звернути увагу на той факт, що коливання тиску в трубопроводі відбуваються навколо значення значно більшого, ніж тиск в системі водопроводу від якої живиться експериментальна установка. Тиск в системі водопроводу складає приблизно 442 кПа (4,5 бари). За класичною схемою гідроудару тиск повинен був би коливатися навколо цього значення. А насправді під час проведення експерименту № 9 коливання відбуваються спочатку навколо значення 1226 – 1177 кПа і потім поступово цей тиск знижується. Помітивши це явище, в одному з експериментів (експеримент №4) було значно збільшено час реєстрації тиску автономними манометрами. При цьому описана тенденція підтвердилася. Спочатку коливання тиску відбувалися навколо значення 1472 кПа (рис. 4). Менше ніж за 1 секунду коливання тиску припинилися, тиск вирівнявся і поступово став знижуватися. Через 10 секунд тиск дорівнював 1030 кПа і продовжував далі знижуватися. На цьому запис був припинений через великий об’єм цифрової інформації.

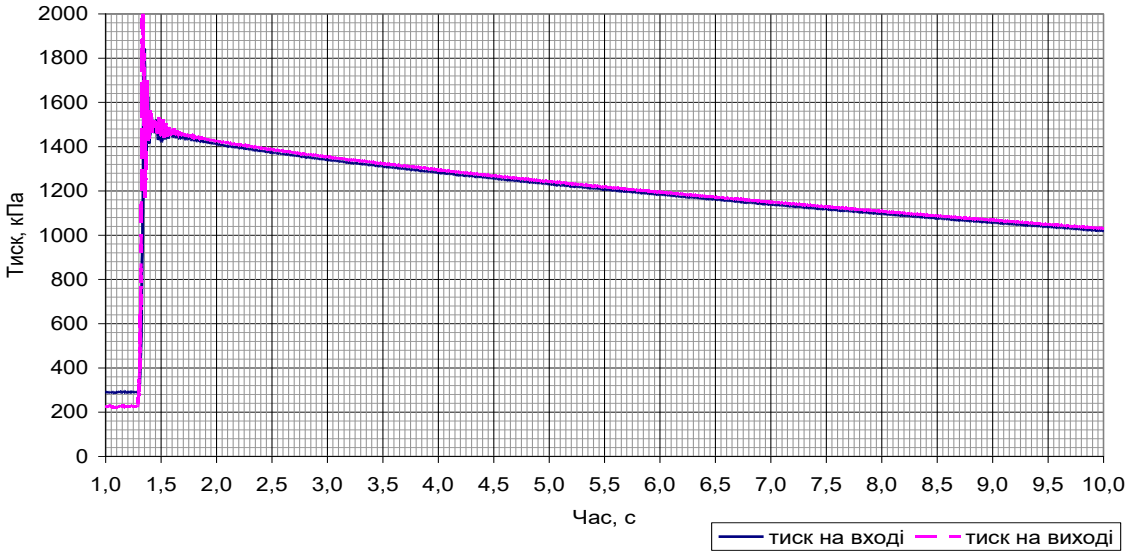


Рис. 4. Змінення тиску під час виникнення гідравлічного удару. Експеримент №4. Початкове значення тиску - 300 кПа.

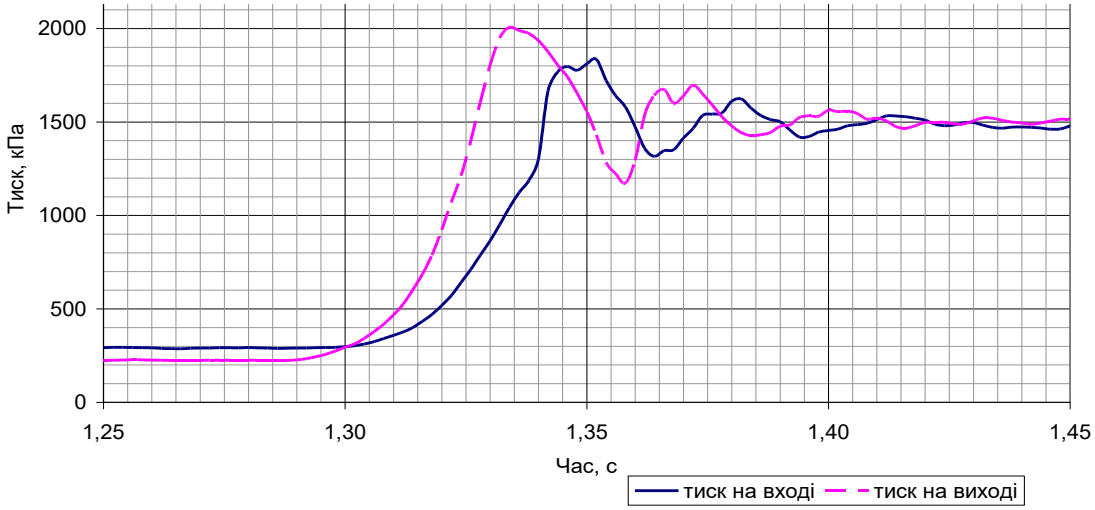


Рис. 5. Змінення тиску при гідравлічному ударі в межах проміжку часу де спостерігається суттєве коливання тиску. Експеримент №4.

Аналізуючи це явище, ми дійшли висновку, що воно викликане наявністю зворотного клапана 4 на початку трубопроводу (рис. 1). Коли хвиля підвищеного тиску, викликана закриванням крана 3, доходить до початку трубопроводу, то тиск в усьому трубопроводі (ударний тиск) стає більшим (932,8 кПа), ніж тиск в водопровідній трубі від якої живиться установка (442 кПа). Цій ситуації відповідає точка 1 на рис. 3. Якби на трубопроводі не було зворотного клапана 4, то вода з трубопроводу почала б витікати в водопровідну систему, а по трубопроводу в зворотному напрямі –поширюватись хвиля зниження тиску. Але, за наявності клапана 4, вода при спробі витікання в водопровідну систему «натикається» на закритий зворотний клапан і ударний тиск при цьому ще більше підвищується як при відбиванні ударної хвилі від тупика. Надалі маємо таку ситуацію, коли обидва кінці експериментального трубопроводу закриті (з одного боку закритий кран 3, а з другого закритий клапан 4) і трубопровід «ізольовано» від системи водопроводу. Ця «ізоляція» відбулася в момент, коли тиск в експериментальному трубопроводі був значно вищий, ніж тиск в системі водопроводу. Тому подальші коливання тиску відбуваються навколо значення значно більшого, ніж тиск в системі водопроводу.

В подальшому, через розсіювання енергії, коливання тиску досить швидко згасають, але тиск в ізольованому трубопроводі залишається підвищеним у порівнянні з системою водопроводу. Якби система була абсолютно герметичною, то тиск в трубопроводі таким би і залишався, поки не буде відкрито кран 3. Насправді зворотний клапан не може бути абсолютно герметичним, тому через нього вода поступово просочується в систему водопроводу і тиск поступово знижується, що і реєструють автономні манометри (рис 4).

Слід відзначити, що Будівельні норми України (ДБН В.2.5-64:2012) [2] вимагають (п. 9.13) установлювати на вводах в квартири зворотні клапани. Тому описане вище явище може мати суттєве значення для систем внутрішнього водопроводу.

Отримані діаграми дають можливість, також, визначити фактичну швидкість розповсюдження хвилі ударного тиску по трубопроводу. Це може бути корисним тому, що теоретичне визначення цієї величини для пластмасових труб неможливе, так як для поліетилену не можна застосовувати закон Гука. Як видно із діаграми на рис. 3, фаза гідравлічного удару складає 0,032 секунди. Враховуючи, що довжина трубопроводу складає 8,35 м, швидкість розповсюдження тиску вздовж трубопроводу складе .

$$a = \frac{4 \cdot 8.35}{0,032} \cong 1044\, м/с$$

Для фахівців може бути цікавим, також, порівняння фактичних і розрахункових втрат напору в поліетиленових трубах. Для цього в колонках 6 і 7 табл. 1 наведені показання автономних манометрів на початку і в кінці трубопроводу до початку гідравлічного удару. В показаннях манометрів спостерігається деяка пульсація. Тому в колонки 6 і 7 для кожного досліду занесене середнє показання відповідного манометра за проміжок часу від початку запису до початку закривання крана. Різниця між цими показаннями складає втрату тиску ΔP в Па, а фактична втрата напору (колонка 10) складе,

$$h = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

де Δp – втрати тиску в Па; ρ=1000 кг/м^3 – густина води.

Розрахункові втрати напору (колонка 11 табл. 1) визначені у відповідності з рекомендаціями Державних будівельних норм України (ДБН В.2.5-74:2013, додаток К) [3]. Згідно з цими нормами втрати напору в пластмасових трубах розраховуються за формулою

$$h_{розр} = L \cdot 0,000685 \frac{V^{1.774}}{d^{1.226}} + \sum \xi \frac{V^2}{2g} \ ,$$

де L = 8,35 м – довжина трубопроводу; V – швидкість руху води в трубопроводі, м/с, (колонка 5 табл. 1); d = 0.0144 м – внутрішній діаметр трубопроводу ([1] рис. 3); $\Sigma\xi$=2×0,5 – сума коефіцієнтів місцевих опорів на трубопроводі (два коліна).

Порівнюючи колонки 10 та 11 табл. 1 можна зробити висновок, що в усіх проведених дослідах фактичні втрати напору в поліетиленовому трубопроводі перевищують розрахункові. Найбільше перевищення доходить до 1,7 рази. Причому спостерігається тенденція зростання цього перевищення із зростанням швидкості руху води в трубопроводі. На це слід звернути увагу особливо при проектуванні довгих трубопроводів. На нашу думку врахування зміни коефіцієнту тертя у випадку неусталеного руху [4, 5] або «відновлення» втрат напору» [6] можна не враховувати через малу протяжність трубопроводу.

Слід зазначити, що під час проведення експерименту №8 гідравлічний удар в трубопроводі викликався швидким закриттям крана 2 на початку трубопроводу. Така схема гідравлічного удару не характерна для систем внутрішнього водопроводу, хоча і поширена для напірних водоводів насосних станцій. Подібна ситуація може виникати у випадку відключення та включення водопостачання при погодинній подачі води споживачам. Як видно із рис. 5, тиск біля крана 2 спочатку знизився до нуля, а потім спостерігався різкий сплеск тиску до величини 977 кПа. Розтягнутий у часі період зниженого тиску (біля 0,7 секунди) свідчить про те, що вода по інерції відривається від закритого крана 2.

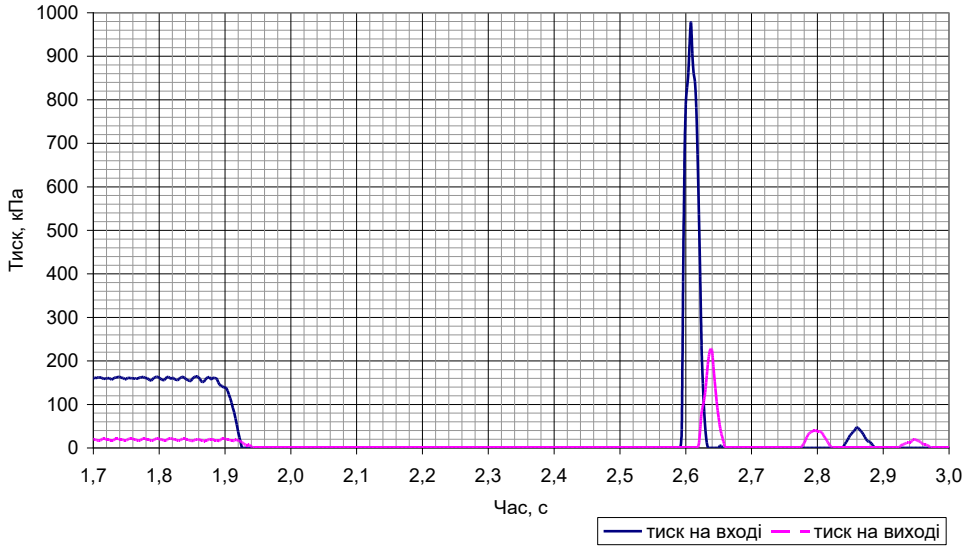


Рис. 5. Змінення тиску під час виникнення гідравлічного удару у випадку закривання крана на вході. Експеримент №8. Початкове значення тиску - 165 кПа.

Тобто біля крана виникає розрив суцільності потоку з вакуумом. На жаль, використані нами автономні манометри не спроможні вимірювати і реєструвати величину вакууму. Тому протягом усього періоду, коли тиск у трубопроводі був менший за атмосферний, вони показували нульовий тиск.

Якщо порівняти отримані експериментальні величини тиску при гідравлічних ударах з розрахунками за класичною формулою М.Є. Жуковського [7], прийнявши швидкість розповсюдження хвилі тиску 1044 м/с, то виявляється, що експериментальні значення менші від розрахункових. Наприклад в експерименті №9 виміряний тиск складає 1642 кПа, а розрахунковий за формулою Жуковського – 2655 кПа. Подібне співвідношення спостерігається в усіх експериментах. Це пояснюється, на нашу думку, тим, що під час експериментів ми мали непрямі гідравлічні удари, тобто час закривання крану 3 був більшим за фазу гідравлічного удару. При довжині трубопроводу 8,35 м і швидкості розповсюдження хвилі тиску 1044 м/с фаза удару складає 0,016 секунди, тобто менше ніж 0,02 секунди. Вручну, як це робилося при дослідах, закрити кран за такий час нереально. Про це свідчать і записані діаграми тиску. Наприклад, з рис. 3 видно, що тиск в трубопроводі при закриванні крана 3 наростає плавно, тоді як при миттєвому закритті він також повинен був би зрости миттєво. Це має суттєве значення, тому що саме плавне закривання водорозбірної арматури запобігає виникненню значних гідравлічних ударів в системах внутрішнього водопроводу. Слід відзначити, що клапани подачі води пристроїв, які підключаються до внутрішнього водопроводу можуть спрацьовувати швидше, ніж при ручному закриванні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Колотило М.І,, Рязанцев О.І. Експериментальне дослідження гідравлічного удару у внутрішніх системах водопостачання із полімерних труб // Науковий вісник будівництва. Харків. ХДТУБА, ХОТВ АБУ/ – 2016. – Вип.3/85. с.
2. ДБН В.2.5-64:2012 Внутрішній водопровід та каналізація.
3. ДБН В.2.5-74:2013 Водопостачання зовнішні мережі та споруди Основні положення проектування.
4. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 239 с.
5. Розенберг И.Г. Гидравлическое сопротивление трубопровода при нестационарном турбулентном режиме течения. – Дисс. … канд.техн. наук. – Москва, 1985, 148 с.
6. Дикаревский В.С. Коэффициент гидравлического сопротивления, потери энергии на внутреннее трение в материале труб, интерференция волн при гидравлических ударах. – В кн.: Гидравлический удар в трубопроводах: Сб. тр. / Ленингр. ин-т. инж. железнодорожного транспорта, Ленинград, 1971, Выпуск 321, с.73-110.
7. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – Избранные сочинения. Москва-Ленинград, 1948, т.2, с.3-73.