

UDC 532.595 : 534.833 : 622.648

SCOPUS CODE 2210

DOI: <https://doi.org/10.36073/1512-0996-2019-3-78-85>

## Свободный, нерастворенный в жидкости воздух – эффективное средство для гашения гидравлических ударов в напорных гидротранспортных системах

Леон Махарадзе

Департамент горной технологии, Грузинский технический университет, Грузия,  
0160, Тбилиси, ул. М. Костава 75  
E-mail: [lmakharadze@gtu.ge](mailto:lmakharadze@gtu.ge)

### Рецензенты:

Г. Кирмелашвили, профессор факультета информатики и систем управления ГТУ

E-mail: [gkirmelashvili@gtu.ge](mailto:gkirmelashvili@gtu.ge)

А. Бежанишвили, профессор горно-геологического факультета ГТУ

E-mail: [bezhanishvili@gmail.com](mailto:bezhanishvili@gmail.com)

---

**Аннотация.** В настоящее время напорные гидротранспортные системы находят широкое распространение во многих отраслях промышленности из-за своих многих положительных сторон. Однако из-за специфики эксплуатации, в аналогичных системах часто возникают нестационарные процессы и гидравлические удары, которые отрицательно влияют на режим их работы, так как нередко являются причинами серьезных аварий. Исходя из этого, борьба против таких явлений является актуальной проблемой. Из многих средств и способов, разработанных нами, таким способом является свободный выпуск нерастворенного в капельной жидкости воздуха в напорные гидротранспортные системы, который эффективно

предотвращает возникновение гидравлических ударов, что подтверждено теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными нами.

**Ключевые слова:** гидравлические удары; гидротранспортные системы; затухание процесса; концентрация воздуха; многофазный поток; нестационарные процессы; превышение давлений.

---

### Введение

Со второй половины прошлого века напорные гидротранспортные системы, т.е. транспортирование различных твердых сыпучих материалов посредством потока капельной жидкости (в основном воды) по трубопроводам нашло широкое применение во

многих сферах промышленности и сельского хозяйства. Это обусловлено многими положительными свойствами по отношению к традиционным видам транспорта [1-7]. Кроме того, что этот вид транспорта очень чистый, в некоторых случаях, например, в горном деле, когда необходимо частичное или полное обогащение полезных ископаемых, с этим видом транспорта не может конкурировать ни один другой вид транспорта.

При напорном трубопроводном гидротранспорте по трубопроводам фактически всегда транспортируется трехфазная гидроаэросмесь (частицы твердых сыпучих материалов+несущая среда – капельная жидкость+ нерастворенный в жидкости воздух, которым обложены частицы твердого сыпучего материала). Особенно примечательным является то обстоятельство, что в процессе транспортирования, т.е. при перемещении по трубопроводу, в зависимости от изменения давления, могут измениться объемы составляющих элементов и соответственно их концентрации в данном сечении. Из-за этого обстоятельства по всей длине трубопроводной магистрали режим движения потока гидроаэросмеси не может быть полностью установившимся, что соответственно влияет как на характер протекания процесса, так и на величину изменения давления.

Из вышеизложенного видно, что процесс является весьма сложным, поэтому со второй половины прошлого века в Горном институте им. Г.А. Цулукидзе начались крупномасштабные фундаментальные исследования нестационарных процессов и гидравлических ударов в напорных трубопроводных гидротранспортных системах и с учетом полученных результатов разработка эффективных способов и

средств для борьбы против этих нежелательных явлений [1-7], чтобы обеспечить надежную работу аналогичных систем в любом случае эксплуатации.

В настоящей работе рассматривается фрагмент из этих исследований, в котором отражены результаты исследований свободного, нерастворенного в жидкости воздуха, как эффективного средства для гашения гидравлических ударов в напорных трубопроводных гидротранспортных системах.

### Основная часть

Как было сказано выше, нами были проведены фундаментальные исследования нестационарных процессов и гидравлических ударов в напорных гидротранспортных системах. Были проведены теоретические и экспериментальные исследования как на лабораторных, так и на промышленных установках. Для исследований в лабораторных условиях специально были смонтированы полупромышленные установки. В теоретической части исследования были основаны на теории Н.Е. Жуковского [8]. По этой теории основным параметром существенно влияющим как на характер протекания в трубопроводах, так и на величину превышения давления над давлением при установившемся режиме, является скорость распространения волны возмущения при неустановившихся процессах. Исходя из этого, нами на лабораторных экспериментальных установках были проведены исследования по ее определению при транспортировании двухфазных (частицы твердых сыпучих материалов+несущая среда – капельная жидкость) и трехфазных (частицы твердых сыпучих материалов+несущая среда – капельная жидкость+ сво-

ბოდნადი ნარაწვორენადი ვადკოწი ვოწდუხ) პოწოკოვ. ნა ვადკოწი სკოროწი რაწვოწრადენადი ვოწნი გიდრავლიწკოწკო უდარა ვ ტრუბოწვოწდე პრე ტრანწპოწრადენადი ტრეხწვადნადი გიდროაწროწმეწადი წუწადენადი ვლიადენადი ნაწიწკი წვოწბოწდნადი, ნარაწვორენადი ვ კაწელწიწადი ვადკოწი ვოწდუხა, ბოწმწადი მოდულუ უწრუგოწი კოწოროგო წადკოწადი წენადი ბოწმწადი მოდულუ უწრუგოწი ნეწუწეწადი კაწელწიწადი ვადკოწი, კაკ პრავიწლო, ვოწდი, ტემ ბოწმეწადი წვოწბუწადი მადრადიწადი.

წ წეწადი ბოწმწადი ვლიადენადი ბოწმწადი წვოწბოწდნადი, ნარაწვორენადი ვ კაწელწიწადი ვადკოწი ვოწდუხა ნა სკოროწი რაწვოწრადენადი ვოწნი გიდრავლიწკოწკო უდარა, ნა ლაბოწრადორწადიწადი უწადნოწკადი ვ ტრუბოწვოწდოწადი წვოწრადენადი დიადმეტრადიწადი 51,5; 68, 81, 104 დი 146 მმ ბადიწადი წვოწბოწდენადი წეწადიწადი იწვლედოწვადი, რეწუწადიწადი კოწოროგო წვდენადი ვ ტაბლიწე 1. პო ესწიწადი დანწადიწადი პოწროწენადი ექწპერადენადიწადი კრადვიწე, კოწოროგო წვდენადი ვ მოწოგრაწიწადი [7].

ოწკადი ბადიწადი წვოწბოწდენადი პრე ტრანწპოწრადენადი წიწადიწადი ვოწდი, დვუწადწადიწადი პოწოკოვ (ვოწდა+ნარაწვოწ-

რენადი წეწადი ვოწდუხ, დი ვოწდა+წადიწადიწადი წვოწბუწადი წვოწბოწდენადი ნარაწვორენადი ვ ტრეხწვადნადი პოწოკოვ (ვოწდა+ნარაწვორენადი ვ ნეწდუწადი+წადიწადიწადი წვოწბუწადი წვოწბოწდენადი წვოწბოწდენადი).

ნა ბოწმწადი აწკერადენადიწადიწადი იწვლედოწვადიწადი ნაწიწკი პოწოწენადი ემწირადიწადიწადი წადკოწადი ვლიადენადი სკოროწი რაწვოწრადენადი ვოწნი გიდრავლიწკოწკო უდარა ვ ტრუბოწვოწდოწადიწადი პრე ტრანწპოწრადენადიწადი დვუწადწადიწადი პოწოკოვ (ვოწდა – კაწელწიწადი ვადკოწიწადი+წვოწბოწდნადი, ნარაწვორენადი ვ კაწელწიწადი ვადკოწიწადი ვოწდუხ) ვ წადკოწადიწადი ბოწმწადი ვლიადენადი ვოწნი გიდრავლიწკოწკო უდარა ვ პოწოკოვ, კოწოროგო იწვლედოწვადი წვდენადი:

$$a_{\text{эмп.}} = \frac{0,049 \cdot a_{\text{теор.}}}{K_{\text{воз.}}^{1,86} + 0,065} + a_{\text{воз.}}, \quad (1)$$

გდე  $a_{\text{воз.}}$  – სკოროწი რაწვოწრადენადი ვოწნი გიდრავლიწკოწკო უდარა ვ ვოწდუხე, მ/წ;  $a_{\text{теор.}}$  – ტეოწრეწიწკოწკო წადკოწადი სკოროწი ვოწნი გიდრავლიწკოწკო უდარა ვ ტრუბოწვოწდოწადი,

ტაბლიწა 1

**რეწუწადიწადი ექწპერადენადიწადი იწვლედოწვადიწადი ეწწედვადიწადი ვლიადენადი წვოწბოწდნადი, ნარაწვორენადი ვ კაწელწიწადი ვადკოწიწადი ვოწდუხა, ნა წეწადიწადი გადწენადი გიდრავლიწკოწკო უდარა ვ ტრუბოწვოწდოწადი**

პარამეტრადიწადი ტრუბოწვოწდოწადი: ვწვოწრადენადი დიადმეტრადი $D_{\text{тр.}}$ , მმ; ტოწლიწადი წენადიწადი, $\delta_{\text{тр.}}$ , მმ	ტეოწრეწიწკოწკო წადკოწადი რაწვოწრადენადი ვოწნი გიდრავლიწკოწკო უდარა (პო წორმულე 6), $a_{\text{теор.}}$ , მ/წ	პლიწოწადი ტრანწპოწრადენადიწადიწადი ტრუბოწვოწდოწადი გიდროწმეწადი (ვოწდი), $\rho$ , კგ/მ <sup>3</sup>	ბოწმწადი წადკოწადიწადი ვოწდუხა ვ პოწოკოვ გიდროწმეწადი (ვოწდი), $K_{\text{воз.}}$	წადკოწადიწადი ვოწდუხა ვ % ბოწმწადი წადკოწადიწადი, ტრანწპოწრადენადიწადიწადი გიდროწმეწადი (ვოწდი), $K_{\text{воз.}}$ , %	ექწპერადენადიწადიწადიწადი წადკოწადიწადი რაწვოწრადენადი ვოწნი გიდრავლიწკოწკო უდარა, $a_{\text{эксп.}}$ , მ/წ	ტეოწრეწიწკოწკო წადკოწადიწადი წვდენადიწადიწადი გიდრავლიწკოწკო უდარე (პო წორმულე 4) $\Delta P$ , МПа	ექწპერადენადიწადიწადიწადი წადკოწადიწადი წვდენადიწადიწადი გიდრავლიწკოწკო უდარე, $\Delta P_{\text{эксп.}}$ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
$D_{\text{тр.}}= 51,5; \delta_{\text{тр.}}=6$	1368	1000	0,005	0,5	575	3,42	1,40
-«-	1368	1150	0,001	0,1	1150	3,93	3,15
-«-	1368	1150	0,003	0,3	1020	3,93	2,86

-«-	1368	1150	0,005	0,5	630	3,93	1,82
-«-	1368	1150	0,008	0,8	480	3,93	1,35
-«-	1368	1150	0,010	1,0	440	3,93	1,21
$D_{тр}= 68; \delta_{тр}= 4$	1368	1000	0,005	0,5	540	3,29	1,38
-«-	1368	1150	0,001	0,1	1140	3,79	3,25
-«-	1368	1150	0,003	0,3	780	3,79	2,25
-«-	1368	1150	0,005	0,5	620	3,79	1,70
-«-	1368	1150	0,008	0,8	510	3,79	1,52
-«-	1368	1150	0,010	1,0	460	3,79	1,30
$D_{тр}= 81; \delta_{тр}= 4,25$	1307	1000	0,005	0,5	520	2,61	1,05
-«-	1307	1150	0,0012	0,12	1050	3,00	2,40
-«-	1307	1150	0,0017	0,17	950	3,00	2,20
-«-	1307	1150	0,0038	0,38	680	3,00	1,50
-«-	1307	1150	0,0053	0,53	550	3,00	1,30
-«-	1307	1150	0,0099	0,99	410	3,00	0,92
$D_{тр}= 104; \delta_{тр}= 5$	1298	1000	0,005	0,5	500	3,24	1,31
-«-	1298	1150	0,001	0,1	1080	3,73	3,10
-«-	1298	1150	0,003	0,3	750	3,73	2,25
-«-	1298	1150	0,005	0,5	570	3,73	1,52
-«-	1298	1150	0,008	0,8	460	3,73	1,30
-«-	1298	1150	0,010	1,0	430	3,73	1,18
$D_{тр}= 146; \delta_{тр}= 11,5$	1339	1000	0,005	0,5	420	2,68	0,82
-«-	1339	1150	0,0014	0,14	940	3,08	2,20
-«-	1339	1150	0,0019	0,19	840	3,08	1,92
-«-	1339	1150	0,0038	0,38	600	3,08	1,40
-«-	1339	1150	0,0086	0,86	390	3,08	0,90
-«-	1339	1150	0,0120	1,20	360	3,08	0,81

определенное согласно теории Н.Е. Жуковского [8],  
 м/с;  $K_{воз.}$  - концентрация воздуха в потоке капельной  
 жидкости – воды.

На основе анализа этих же экспериментальных  
 исследований нами получена эмпирическая зависи-  
 мость для определения скорости распространения  
 волны гидравлического удара в трубопроводах при  
 транспортировании трехфазного потока (вода – ка-  
 пельная жидкость+твердые частицы твердых сыпу-  
 чих материалов+свободный, нерастворенный в ка-  
 пельной жидкости воздух), которая имеет вид:

$$a_{эмп.} = \frac{0,49 \cdot a_{теор.}}{K_{воз.}^{1,86} \cdot K_{см.}^{1,05} + 0,065} + a_{воз.}, \quad (2)$$

где  $K_{см.}$  – концентрация твердого сыпучего мате-  
 риала в потоке гидроаэросмеси.

На основании наших исследований установлено,  
 что при транспортировании твердых частиц сыпучих  
 материалов скорость теоретического значения этого  
 же параметра для данного трубопровода всегда мень-  
 ше теоретического значения этого же параметра, оп-  
 ределенного по формуле Н.Е. Жуковского. Эта раз-  
 ница (в сторону уменьшения) увеличивается с уве-

личением концентрации гидросмеси, то есть с увеличением насыщения потока воды частицами твердого сыпучего материала. Это можно объяснить тем, что с твердыми частицами сыпучих материалов в трубопровод все же попадает определенный объем свободного, нерастворенного в воде воздуха. При увеличении же концентрации воздуха в потоке водовоздушной смеси, увеличение насыщенности последнего частицами твердого материала практически не влияет на скорость распространения волны гидравлического удара.

На основании анализа экспериментальных исследований нами получена эмпирическая зависимость для определения скорости распространения волны гидравлического удара для данного трубопровода, в зависимости от объемной концентрации гидросмеси, которая имеет вид:

$$a_{эмп.} = a_{теор.} \exp(-1,2 \cdot 8,5 D_{тр} S_{см}), \quad (3)$$

где  $D_{тр}$  - внутренний диаметр трубопровода, мм;  
 $S_{см}$  - объемная концентрация гидросмеси.

Справедливость результатов, полученных нами на лабораторных установках нами проверена на крупных промышленных установках. Эти исследования позволили установить оптимальный объем свободного, нерастворенного в капельной жидкости (в воде) воздуха, впуск которого в трубопроводы обеспечивает снижение скорости распространения волны гидравлического удара для данного трубопровода до такой степени, что повышение давлений при гидравлических ударах не превышало допустимых значений. Для этого достаточно в трубопроводы впускать воздух под атмосферным давлением в объеме 0,25 –

1,5 % от общего объема транспортируемой по трубопроводу гидросмеси [10], подтверждением этого являются осциллограммы, приведенные на рис. 1.

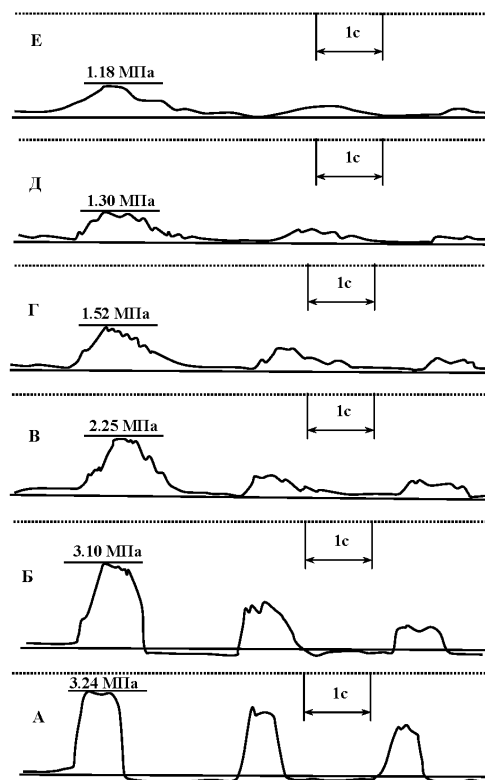


Рис. 1. Осциллограммы гидравлических ударов в трубопроводе  $D_{тр}=104$  мм, при транспортировании гидросмеси плотностью  $\rho_{см}=1100$  кг/см<sup>3</sup> со скоростью  $v_0 = 2,5$  м/с, скорость распространения волны гидравлического удара (экспериментальное значение)  $a_{эмп.} = 1180$  м/с: А – прямой гидравлический удар; Б – при концентрации воздуха в потоке  $K_{воз.}=0,1$  %; В – при  $K_{воз.}=0,3$  %; Г – при  $K_{воз.}=0,5$  %; Д – при  $K_{воз.}=0,8$  %; Е – при  $K_{воз.} = 1,0$  %

Основным параметром при определении изменения давления во время нестационарных процессов и гидравлических ударов, согласно теории Н.Е. Жуковского [8], является скорость распространения волны возмущения в напорных трубопроводах, так как превышение давления  $\Delta P$  при таких процессах определяется по зависимости

$$\Delta P = av_0\rho, \quad (4)$$

$a$  - სიჩქარე გავრცელების ტალღის ლიკროდინამიკული დარღობის ნაპირის ტუბოპროდუქტში, მ/ს;  $v_0$  - სიჩქარე მოძრაობის ნაკადის სითხის მასის ტუბოპროდუქტში ნაწილობრივ რეჟიმში, მ/ს;  $\rho$  - სიმკვრივე, ტრანსპორტირებული ტუბოპროდუქტის სითხის მასის, კგ/მ<sup>3</sup>.

სრულად წნევა ნაწილობრივ რეჟიმში განისაზღვრება ფორმული ნაპირის ტუბოპროდუქტში

$$P = P_{\text{რეზ.}} + \Delta P, \quad (5)$$

სადა  $P_{\text{რეზ.}}$  - რეზ. წნევა ნაპირის ტუბოპროდუქტში ნაწილობრივ რეჟიმში, პა;

$$a_{\text{თეორ.}} = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon_e}{E} \cdot \frac{D_{\text{ტუბოპროდუქტის}}}{\delta_{\text{ტუბოპროდუქტის}}}}}, \quad (6)$$

$\epsilon_e$  - მოცულობითი მოდული სიბრტყის სითხის,  $\epsilon_e = 2,1 \cdot 10^3 \text{ მპა}$ ;  $E$  - მოდული სიბრტყის მასალის (სტალი) რომელიც გაწარმებული ტუბოპროდუქტის,  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ მპა}$ ;  $\delta_{\text{ტუბოპროდუქტის}}$  - სისქე ტუბოპროდუქტის, მმ.

### დასკვნა

როგორც აღინიშნა, ნაპირის ტუბოპროდუქტის ლიკროდინამიკული დარღობის ტუბოპროდუქტის გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო

სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო

სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო

სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო სიბრტყის სითხის ტრანსპორტირების გამო

### ლიტერატურა

1. Makharadze L.I. Effective remedies of protection of pressure pipelines against water hammers. Domestic and foreign experience. TSINIS. Moscow. 1979, 67 p. (in Russian).
2. Makharadze L.I. Protection of hydrotransport systems against hydraulic impact. Tbilisi: "Metsniereba". 1996, 150 p. (in Russian).
3. Makharadze L.I., Kirmelashvili G.I. Hydraulic impact in pipelines at transportation of multiphase hydromixes. Tbilisi: "Metsniereba". 1997, 232 p. (in Russian).

4. Dmitriev G., Makharadze L., Gochitashvili T. Pressure hydrotransport system. Manual. Moscow: “Nedra”. 1991, 304 p. (in Russian).
5. Makharadze L.I. The guide for protection of the pressure hydrotransport systems against water hammers of BCH 01-81. Tbilisi: “Metsniereba”. 1981, 151 p. (in Russian).
6. Makharadze L.I. Means for prevention of fluctuation and deformations of pipelines. Construction of pipelines. №10. Moscow. 1974, 31-32 pp. (in Russian).
7. Makharadze L.I., Kirmelashvili G.I. Nonstationary processes in foreign hydrotransport systems and protection from water hammers. Tbilisi: “Metsniereba”. 1986, 152 p. (In Russian).
8. Zhukovsky N.E. About water hammer in water pipes. Moscow-Leningrad: “Gostekhtheoretizdat”. 1949, 104 p. (in Russian).
9. Makharadze L.I., Gochitashvili T.Sh., Sulaberidze D.G. Rational method of calculation of hydrotransport systems pipelines. Moscow: “Construction of pipelines”. № 8. 1980, 29-30 pp. (in Russian).
10. Makharadze L.I. and others. The method to prevent water hammers in slurry pipelines and conduits. Patent 501245. USSR. Bulletin №4. 1976. (In Russian).

UDC 532.595 : 534.833 : 622.648

SCOPUS CODE 2210

DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.36073/1512-0996-2019-3-78-85](https://doi.org/10.36073/1512-0996-2019-3-78-85)

## თავისუფალი, სითხეში გაუხსნელი ჰაერი – სადაწნეო ჰიდროსატრანსპორტო სისტემაში ჰიდრავლიკური დატყმის ჩაქრობის ეფექტური საშუალება

ლეონ მახარაძე

სამთო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 75  
E-mail: [lmakharadze@gtu.ge](mailto:lmakharadze@gtu.ge)

### რეცენზენტები:

გ. ყირმელაშვილი, სტუ-ის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: [gkirmelashvili@gtu.ge](mailto:gkirmelashvili@gtu.ge)

ა. ბეჟანიშვილი, სტუ-ის სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: [bezhanishvili@gmail.com](mailto:bezhanishvili@gmail.com)

**ანოტაცია.** სადაწნეო მილსადენი ჰიდროსატრანსპორტო სისტემა ფართოდ გამოიყენება მრეწველობის მრავალ სფეროში, რაც განპირობებულია მისი მრავალი დადებითი თვისებით ტრანსპორტის სხვა ტრადიციულ სახეობებთან შედარებით. მის ერთ-ერთ უარყოფით მხარედ უნდა ჩაითვალოს ის ფაქტი, რომ დანიშნულების და ექსპლუატაციის სპეციფიკურობის გამო, ანალოგიურ სისტემებში ხშირად წარმოიქმნება არასტაციონარული პროცესები და ჰიდრავლიკური დარტყმები, რაც უარყოფით გავლენას ახდენს სისტემის ეფექტურობაზე, რადგან იწვევს სერიოზულ ავარიებს. ამდენად, ასეთი მოვლენების წინააღმდეგ ბრძოლა აქტუალური სამეცნიერო და საინჟინრო პრობლემაა. მათ წინააღმდეგ ბრძოლის

ერთ-ერთი აქტუალურ მეთოდია თავისუფალი, წვეთოვან სითხეში გაუხსნელი ჰაერი, რომლის შეშვება სადაწნეო მილსადენ სისტემებში აღნიშნული არასასურველი პროცესების წინააღმდეგ ბრძოლის ერთ-ერთი ყველაზე ეფექტური მეთოდია, რაც დადასტურებულია ჩვენ მიერ შესრულებული თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევებით.

**საკვანძო სიტყვები:** არასტაციონარული პროცესები; მრავალფაზიანი ნაკადი; პროცესის მიღევა; წნევის ნაზრდი; ჰაერის კონცენტრაცია; ჰიდრავლიკური დარტყმები; ჰიდროსატრანსპორტო სისტემები.

---

UDC 532.595 : 534.833 : 622.648

SCOPUS CODE 2210

DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.36073/1512-0996-2019-3-78-85](https://doi.org/10.36073/1512-0996-2019-3-78-85)

## Free combined air – as an effective remedy for water hammers attenuation in the pressure head hydrotransport systems

**Leon Makharadze** Department of Mining Technology, Georgian Technical University, 75 M. Kostava str. 0160, Tbilisi, Georgia  
E-mail: [lmakharadze@gtu.ge](mailto:lmakharadze@gtu.ge)

### Reviewers:

**G. Kirmelashvili**, Professor, Faculty of Informatics and Control Systems, GTU

E-mail: [gkirmelashvili@gtu.ge](mailto:gkirmelashvili@gtu.ge)

**A. Bezhanishvili**, Professor, Faculty of Mining and Geological, GTU

E-mail: [bezhanishvili@gmail.com](mailto:bezhanishvili@gmail.com)

**Abstract.** For now the pressure head hydrotransport systems are used in many industries because of a number of their advanced features. However, because of specific operations and exploitation, there are occurred non-stationary processes and water hammers in similar systems, which have a negative effect on the system performance and often represent the reasons of serious accidents. Obviously it's an actual problem nowadays. To solve this problem we have developed the method of free combined air induction in the pressure head hydrotransport systems which effectively prevents formation of water hammers. It is proved by conducted theoretical and experimental researches and obtained results considered in this article.

**Key words:** Air-concentration; excess pressure; hydrotransport systems; multiphase flow; nonstationary processes; process attenuation; water hammers.

*Дата рассмотрения 08.05.2019*

*Дата поступления 13.05.2019*

*Подписано к печати 24.10.2019*