

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА
ИСПОЛНЕНИЯ ГИДРОСИСТЕМ**

Ф. А. Корсун, к. т. н.

Ключевые слова: *переходной процесс, симметричная модель, несимметричная модель, гидрораспределитель, гидравлический удар (ГУ)*

Проблема. Система кондиционирования рудничного воздуха (СКРВ) глубоких шахт Донбасса имеет два контура: высокого давления – вертикальный и низкого давления – горизонтальный. При передаче холода на глубокий горизонт рекуперативным путём при помощи теплообменника высокого давления (ТВД) возникают большие потери холода. При замене ТВД на гидрораспределитель (ГР) эти потери устраняются, но возникают гидравлические удары (ГУ) в ГР.

Для этого нужно провести исследования ГУ на электрической модели при помощи моделирования. Исследования проводились разными способами. В этой статье будут рассмотрены исследования гидравлических ударов в зависимости от способа исполнения гидравлических систем.

Анализ публикаций. Гидравлическими ударами в вертикальных трубопроводах никто не занимался. Д. К. Смирнов и Л. Б. Зубов занимались гидравлическим ударом в Останкинской башне г. Москвы. Но они останавливали насос, а здесь описываются ГУ при перекрытии потока. При остановке насоса первая амплитуда идет вниз (разряжение, понижение давления), а при перекрытии потока клапаном первая амплитуда – повышение давления и первая гармоника идет вверх.

Цель. Изучение гидравлических ударов в системе кондиционирования рудничного воздуха при переключении потоков жидкости в гидрораспределителе в зависимости от способа использования гидросистем.

Основной материал. Рассмотрены следующие варианты исполнения трубопровода:

1. По способу защиты насоса:
 - а) насос защищен демпфером;
 - б) насос защищен обратным клапаном.
2. По форме трубопровода:
 - а) трубопровод несимметричен относительно задвижки;
 - б) трубопровод симметричен относительно задвижки;
3. По использованию кинетической энергии жидкости при перекрытии трубопровода:
 - а) энергия жидкости рассеивается в трубопроводе;
 - б) энергия жидкости частично поглощается подключенной параллельно гидрораспределителю полезной нагрузкой, величина которой согласована с параметрами трубопровода.

Для этих вариантов на рисунке 1 представлены осциллограммы напряжения в гнезде возмущения переходного процесса ГН-8, соответствующем сечению трубопровода перед задвижкой. Из них следует, что наличие согласованной нагрузки позволяет уменьшить амплитуду первой волны давления в 1,4 раза. При этом максимальный бросок давления как для симметричного, так и для несимметричного трубопровода при любом способе защиты насоса составляет около 2,0 МПа ($n^* = 200$ м). Это относительно большая величина. Этот вариант соответствует несимметричному (относительно точки возмущения) трубопроводу; насос защищён демпфером $\frac{\tau_3}{T_n} = 1$.

Поэтому возникала мысль выполнить управляющий орган так, чтобы он не пропускал постоянную составляющую тока, но пропускал переменную (в натуре – не пропускал жидкость, но пропускал бы волну давления, то есть гасил бы колебания). На модели это можно реализовать с помощью конденсатора достаточно большой емкости, параллельного электронному ключу. В натуре – с помощью демпфера, параллельного задвижке, принципиальная схема которого полностью аналогична схеме демпфера, параллельного насосу.

Этот вариант был проведен на модели. Осциллограммы напряжения в гнездах возмущения переходных процессов ГН-8 и ГН-9 представлены на рисунке 3. Из них видно, что колебания напряжения в этих сечениях полностью устранены, причем такая же картина сохраняется во

всех гнёздах модели.

Этот вариант соответствует симметричному (относительно точки возмущения) трубопроводу; насос защищён демпфером $\frac{\tau_3}{T_n} = 1$.

Для природы из этого следует, что при работе гидрораспределителя с параллельным ему демпфером давление вдоль всего трубопровода переходит от одного установившегося значения к другому плавно, без малейшего броска ($h^* = 0$). При этом не требуется какой-то специальной защиты насоса, упрощается конструкция узлов, защищающих его от случайных бросков давления, исключается возможность кавитации; энергия удара переходит в потенциальную энергию деформированных материалов демпфера и, по крайней мере, частично возвращается в систему при открытии задвижки.

Возникает вопрос о габаритах такого демпфера и его реализуемости.

Расчет и разработка его конструкции представляют собой самостоятельное исследование. Но оценить ориентировочно его параметры можно из следующих соображений.

Демпфер представляет собой некоторый трубопровод длиной $l_{\text{демп}}$, сечением $S_{\text{демп}}$, в котором скорость распространения возмущений $a_{\text{демп}}$ определяется материалом, из которого он изготовлен, заполняющей его жидкостью и растворенным в ней газом. Его можно было бы моделировать не конденсатором С2, а параллельной ключу веткой с распределенными параметрами $C_{\text{демп}}^{\text{пог}}$, $l_{\text{демп}}^{\text{м}}$ для которой

$$k \frac{gS}{a^2} = \frac{gS_{\text{демп}}}{a_{\text{демп}}^2 \cdot C_{\text{демп}}^{\text{пог}}} = \frac{gS}{a^2 C_{\text{пог}}} \quad (1)$$

Умножая обе части этого выражения на константу подобия

$$k_{\ell} = \frac{\ell_{\text{демп}}^{\text{н}}}{\ell_{\text{демп}}^{\text{м}}} = \frac{\Delta \ell_{\text{н}}}{\Delta \ell_{\text{м}}}, \text{ получим}$$

$$\frac{gS_{\text{демп}} \ell_{\text{демп}}^{\text{н}}}{a_{\text{демп}}^2 \cdot C_{\text{демп}}^{\text{пог}} \cdot \ell_{\text{демп}}^{\text{м}}} = \frac{gS \Delta \ell_{\text{м}}}{a^2 C_{\text{пог}} \Delta \ell_{\text{н}}} \quad (2)$$

Учитывая что

$$C2 = C_{\text{демп}}^{\text{пог}} \ell_{\text{демп}}^{\text{м}} \quad (3)$$

$$C1 = C_{\text{пог}} \Delta \ell_{\text{м}} \quad (4)$$

Получим:

$$S_{\text{демп}} \ell_{\text{демп}} = \frac{S \Delta \ell_{\text{н}} a_{\text{демп}}^2 C2}{a^2 C1} \quad (5)$$

Из конструктивных соображений можно принять, что $S_{\text{демп}}$ равна учетверенной площади сечения основного трубопровода.

В опыте, осциллограмма которого представлена на рисунке 3, емкость С2 = 10^{-6} Ф. Однако из энергетических соображений эта емкость должна быть меньше такой, чтобы поглотить энергию, занесенную в катушках индуктивности модели (и даже меньше, если допустимы некоторые колебания напряжения). Поскольку при размыкании ключа она заряжается до потенциала источника питания модели, то:

$$C2 \leq \frac{n_{\text{общ}} L1 i_{M0}^2}{U_{M0}^2} = \frac{54 \times 80 \times 10^{-6} (0.2)^2}{25^2} = 0.276 \times 10^{-6} \text{Ф} \quad (6)$$

Принимая $a_{\text{демп}} = 200$ м/с, подставляя значения всех параметров в формулу (6), получим $\ell_{\text{демп}} = 150 - 160$ м, что, конечно, неприемлемо.

Однако из формулы Н. Е. Жуковского [1]

$$C_v = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_{\text{ж}}}{E_{\text{тр}}}}} \quad (7)$$

не следует каких-либо ограничений на величину $a_{\text{демп}}$, и при соответствующих материалах можно получить $a_{\text{демп}} = 15$ м/с, при этом $\ell_{\text{демп}} \cong 1$ м.

Вариант рисунка 5 соответствует симметричному (относительно точки возмущения) трубопроводу; насос защищен обратным клапаном $\frac{\tau_3}{T_n} = 1$;

Вариант рисунка 6 соответствует наличию или отсутствию демпфера параллельно задвижке.

Приведенные оценки показывают, что последний вариант гашения колебаний давления при работе гидрораспределителя заслуживает внимания.

Сравнение параметров переходного процесса (гидроудара) в ГН8 (перед задвижкой) для разных вариантов исполнения модели (трубопровода) показан на рисунках 1 – 6.

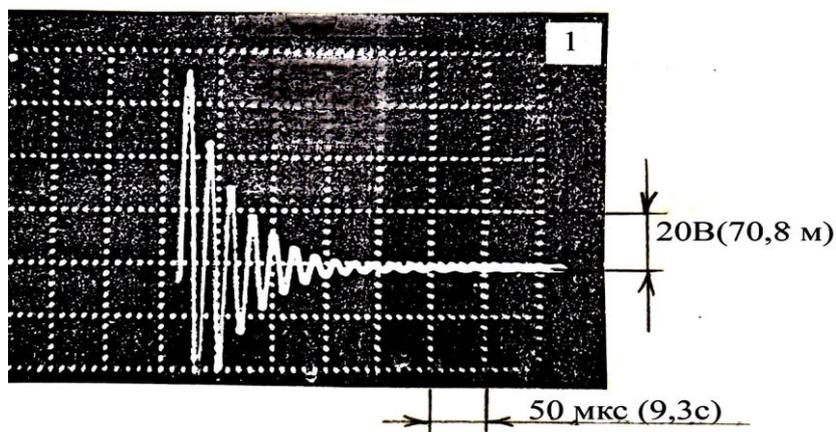


Рис. 1. Осциллограмма переходного процесса несимметричной модели. Источник питания защищён конденсатором; 1 – без согласованной нагрузки.

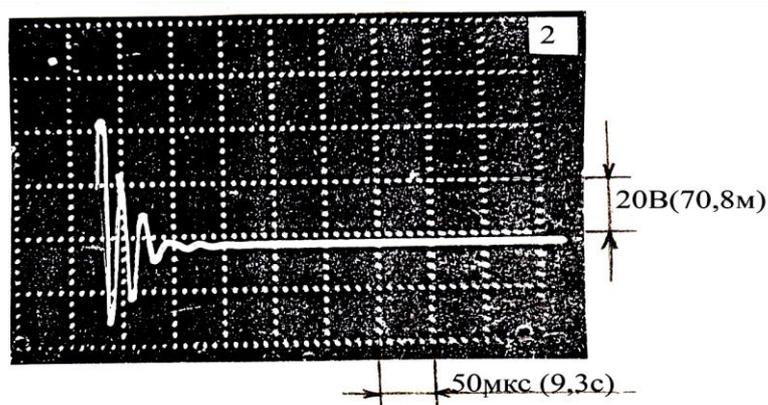


Рис. 2. Осциллограмма переходного процесса симметричной модели. Источник питания защищён конденсатором; 2 – с согласованной нагрузкой

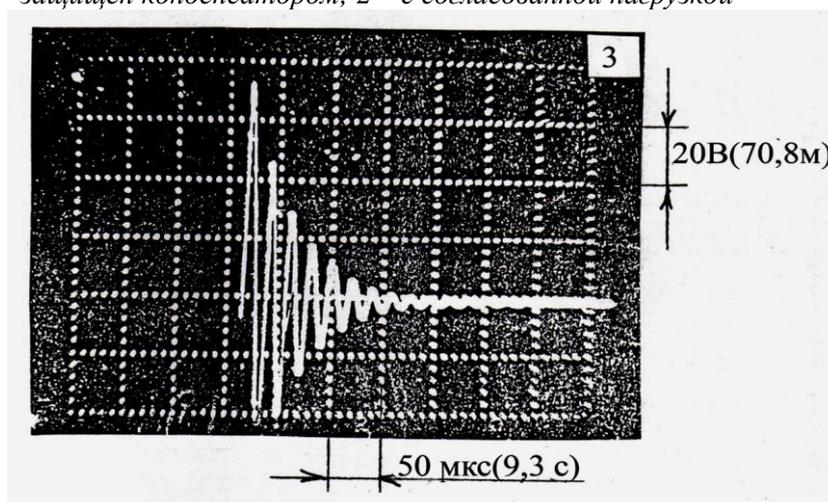


Рис. 3. Осциллограмма переходных процессов симметричной модели. Источник питания защищён конденсатором; 3 – без согласованной нагрузки

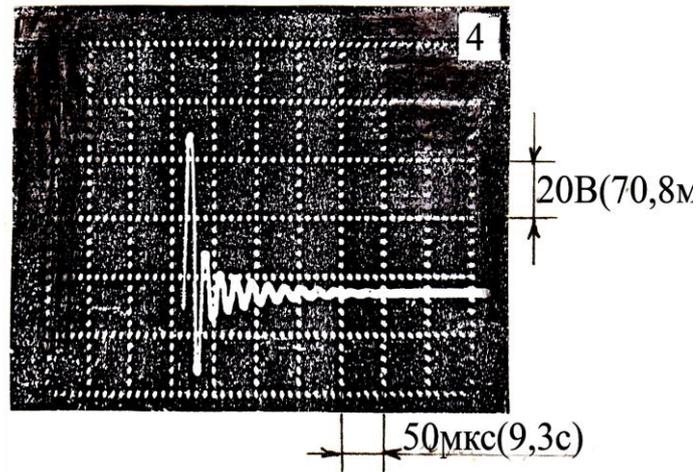


Рис. 4. Осциллограмма переходных процессов симметричной модели. Источник питания защищен конденсатором; 4 – с согласованной нагрузкой

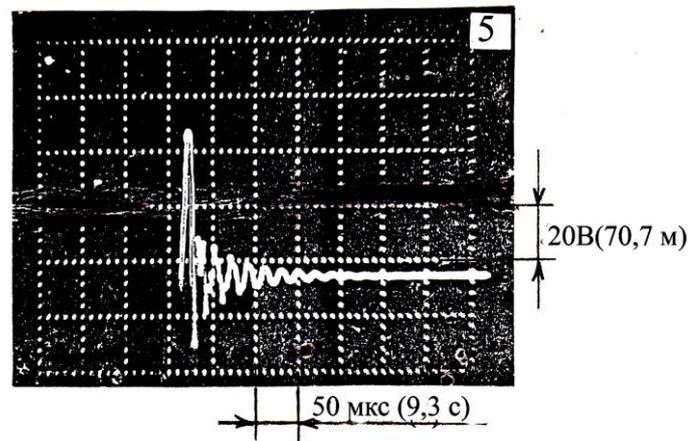


Рис. 5. Осциллограмма переходного процесса в ГН8 симметричной модели. Источник питания защищен диодом $R_{согл} = 2000 \text{ Ом}$

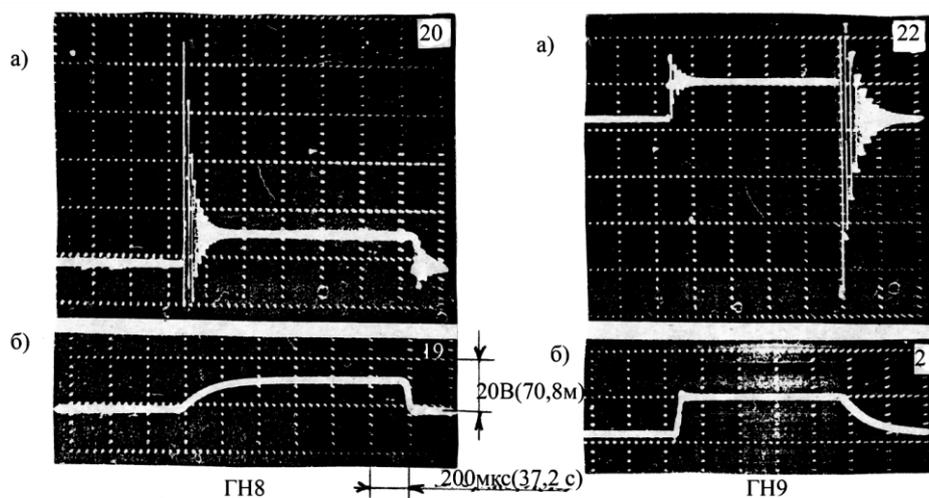


Рис. 6 Осциллограммы переходного процесса в ГН8 и ГН9 модели: а – при отсутствии демпфирующей емкости; б – с демпфирующей емкостью $C3 = 10^{-6} \text{ Ф}$, подключенной параллельно ключу

Выводы. 1. Применение $R_{согл}$ для несимметричной модели приводит в прямой ветви к уменьшению амплитуды напряжения первой гармоники на 42 % в первый полупериод, на 57 %

во второй полупериод, последующие гармоники ослабляются еще больше. В обратной ветви это уменьшение составляет 31 и 49 % соответственно (кривые 1, 2 рис. 1; 2).

2. Применение $R_{\text{созл}}$ для симметричной модели приводит к уменьшению амплитуды напряжения первой гармоники на 41 % в первый полупериод, на 81 % во второй полупериод в прямой ветви. В обратной ветви это уменьшение составляет 40 % и 77 % соответственно (кривые 3, 4, 5 на рис. 3; 4; 5)

3. Время переходного процесса в несимметричной модели при наличии $R_{\text{созл}}$ уменьшается в 2,6 раза.

4. Время основного переходного процесса в симметричной модели уменьшается в 6,8 раза.

Таким образом, по обоим этим параметрам симметричная модель является более предпочтительной. Удовлетворительным является объяснение, что в модели получается бегущая волна, переносящая энергию, занесенную в ветвях, в нагрузку $R_{\text{созл}}$. Аналогично в трубопроводе образуется бегущая волна, переносящая энергию остановленной жидкости полезную нагрузку. Без $R_{\text{созл}}$ при размыкании цепи в модели (как и в натурной гидравлической системе) образуются стоячие волны, энергия которых расходуется на трение.

При применении предлагаемого гидрораспределителя и системы распределения хладоносителя в системах кондиционирования рудничного воздуха шахт экономия теплоты будет составлять примерно 30 – 40 %.

При использовании предлагаемого гидрораспределителя в СКРВ шахт технический эффект заключается в том, что гидравлические удары устраняются, система СКРВ становится проще и надежнее.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Жуковский Н. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – М. : Гос. изд. техн.-теоретич. лит., 1949. – 103 с.
2. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. –М. : Машизд., 1962. – 348с.
3. Zubov J. Повышение точности приближенных аналитических решений уравнений неустановившегося напорного движения жидкости в трубах // Инженерная гидравлика. Сб. науч. тр. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 67 – 73.

SUMMARY

Problem. Investigations of mine air conditioning systems situated in deep mines of Donbas by electric model were performed. Hydraulic impact values depending on the hydrosystems completion method were illustrated in the pictures.

Literature review. No scientific research has been done in the field of hydraulic impacts in vertical pipelines before. D. K. Smirnov and L. B. Zubov were engaged with the problem of hydraulic impact in Ostankino television tower, Moscow. However, they had to stop the pump, whereas therein HI with flow overlapping is described. In case the pump is stopped, the first amplitude goes down (discharging, pressure reduction), whereas in case the flow is lapped with the valve – the first amplitude – pressure increase takes place and the first harmonic goes up.

Aim. Investigation of HI depending on the hydrosystem completion method and in the vertical pipeline.

The following variants of the pipeline have been considered:

1. According to the type of pump protection:
 - a) The pump is protected with the damper;
 - b) The pump is protected with a return valve.
2. According to the pipeline design:
 - a) The pipeline location is asymmetrical comparing to the valve;
 - b) The pipeline location is asymmetrical comparing to the valve.
3. According to the use of kinetic energy of fluid during pipeline closure:
 - a) Fluid energy is dissipated in the pipeline;
 - b) Fluid energy is partially absorbed by the working load acting simultaneously with the hydraulic distributor. Its value corresponds to the pipeline parameters.

For the mentioned variants, Picture 1 shows strain oscillograms in the perturbation pit of the

transitional process GN-8, corresponding to the pipeline section prior to the valve. This implies that the presence of matched load enables to reduce the amplitude of the first pressure wave by 1,4 times. At the same time, maximum pressure surge for both symmetrical and non-symmetrical pipeline with any type of pump protection is around 2,0 MPa ($n^* = 200$ m). This value is relatively large. This variant corresponds to the non-symmetrical pipeline (relative to the perturbation pit); the pump is protected by the damper $\tau_3/T_H = 1$.

That is why there was an idea to perform the control object in such a way that it did not miss a direct current level but would let the alternating component (in kind it should not let the fluid in but it would let the pressure wave in, thus quenching oscillations. In the model it can be applied with the help of large capacity condenser which would be parallel to the electronic key. In kind it is performed with the help of the damper, parallel to the valve whose principal scheme is fully similar to the damper scheme that is parallel to the pump.

The present variant was performed with the help of the model. Strain oscillograms in the perturbation pit of the transitional processes GN-8 and GN-9 are given in picture 3. After their close examination it can be clearly observed that strain oscillations in these sections are fully eliminated. The same is true for all pits of the model.

The present variant corresponds to the symmetrical pipeline (relative to the perturbation pit); the pump is protected with damper; $\tau_3/T_H = 1$.

Consequently, working with hydraulic distributor with the damper parallel to it the pressure down the entire pipeline passes from one steady-state value to the other one smoothly, without jumps ($h^* = 0$). At the same time no special protection of the pump is needed, the design of units that protect it from accidental pressure jumps can be simpler, the possibility of cavitation is eliminated; impact energy is transformed into potential energy of deformed damper materials, and can at least partially return to the system with the opening of the valve.

Conclusion. 1. The application of R_{acc} for a non-symmetrical model in a strict branch leads to the decrease of stress amplitude in the first harmonic component by 42 % during the first one-half period, by 57% during the second one-half period, further harmonic components are even more decreased. In the reverse branch such decrease is 31 % and 49 % respectively (curves 1, 2, pic. 1, 2)

2. The application of R_{acc} for a symmetrical model leads to the decrease of stress amplitude in the first harmonic component by 41 % during the first one-half period, by 81 % during the second one-half period of a strict branch. In the reverse branch such decrease is 40 % and 77 % respectively (curves 3, 4, 5, pic. 3, 4, 5).

3. The time of transitional process in a non-symmetrical model with the presence of R_{acc} is decreased by 2,6 times.

4. The time of the main transitional period in a symmetrical model is decreased by 6,8 times. Thus, according to both parameters symmetrical model is a more favorable one. A satisfactory explanation is that there is a progressive wave, transferring energy brought by branches into R_{acc} load. Similarly, in the pipeline, a progressive wave supplying energy of the halted liquid in the pipeline into effective load. Without R_{acc} during interruption of the circuit in the model (like in full-scale hydraulic system) stationary waves are initiated whose energy is used for traction.

With the application of the proposed hydraulic distributor and cold bearer distribution system in the system of mine air conditioning, heat economy will be approximately 30 – 40 %.

With the application of the proposed hydraulic distributor in the system of mine air conditioning, technical effect lies in the elimination of hydraulic impacts, mine air conditioning system becomes more simplified and reliable.

REFERENCES

1. Zhukovskii N. O gidravlicheskom udare v vodoprovodnyh trubah. – M. : Gos. izd. tehn.-teoretich. lit., 1949. – 103 s.
2. Berzheron L. Ot gidravlicheskogo udara v trubah do razryada v e'lektricheskoy seti. – M. : Mashizd, 1962. – 348 s.
3. Zubov L. Povyshenie tochnosti priblizhennyh analiticheskikh reshenii uravnenii neustanovivshegosya napornogo dvizheniya zhidkosti v trubah // Inzhenernaya gidravlika. Sb. nauch. tr. – M. : Strojizdat, 1972. – S. 67 –73.

УДК 622.4:532.595.2

Результаты исследования нестационарных процессов на электрической модели в зависимости от способа исполнения гидросистем / Ф. А. Корсун // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2014. – № 3. – С. 37 – 43. – рис. 6. – Бібліогр.: (3 назв).

Представлены исследования и рисунки в виде осциллограмм исследования гидравлических ударов на электрической модели в зависимости от способа исполнения гидравлических систем.

Ключевые слова: *переходной процесс, симметричная модель, несимметричная модель, гидрораспределитель, гидравлический удар.*

Результати дослідження несталих процесів на електричній моделі залежно від способу використання гідросистем / Ф. О. Корсун // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2014. – С. 37 – 43. – рис. 6. – Бібліогр.: (3 назв).

Наведено дослідження і рисунки у вигляді осцилограм дослідження гідравлічних ударів на електричній моделі залежно від способу виконання гідравлічних систем.

Ключові слова: *перехідний процес, симетрична модель, несиметрична модель, гідророзподільвач, гідравлічний удар.*

Results of hydraulic impacts investigations using the electrical model depending on the method of hydro-systems performance / F. A. Korsun // Visnyk of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2014. – № 3.– С. 37 – 43. – pic. 6 – Bibliogr.: (3 names).

In the article results of the hydraulic impact research using the electrical model depending on the method of hydro-systems performance and illustrations in the form of oscillograms are presented.

Key words: *transitional process, symmetrical model, non-symmetrical model, hydrodistributor, hydraulic impact.*