

УДК 621.646.942

А.П. КОНОНЕНКО, д-р техн. наук, проф., ДонНТУ, Донецк;
В.П. ОВСЯННИКОВ, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Донецк;
М.В. ОВЕРКО, аспирант, ДонНТУ, Красноармейск

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО ДИОДА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Наиболее часто мощные вертикальные трубопроводы применяются на шахтных водоотливных установках. Опасный гидравлический удар возникает в них при внезапном отключении насоса. В этих условиях средством защиты от опасных колебаний давления может быть гидравлический диод, установленный, например, в середине трубопровода. Наиболее приемлемым типом диода выбран вихревой струйный диод. Трудностью при моделировании переходного процесса в вертикальном трубопроводе с вихревым диодом является его существенная инерционность. Задача была решена с помощью локальной системы координат, которая вводится в программу расчета на время существования обратного тока жидкости. Используя разработанную модель можно определить размеры вихревого диода и рассчитать энергетические потери, которые могут возникнуть при использовании данной схемы защиты.

Ключевые слова: водоотливная установка, защита, напорный трубопровод, моделирование, гидравлический удар, вихревой гидравлический диод.

Введение. Как показывают результаты моделирования динамических процессов в вихревом диоде, время его выхода на режим максимального обратного сопротивления зачастую соизмеримо с фазой гидравлического удара [1]. Это говорит о том, что при расчете колебательного процесса в напорном трубопроводе водоотливной установки его нельзя рассматривать как дискретный безынерционный модуль с двумя значениями гидравлического сопротивления. С другой стороны, эффективность защиты от гидравлического

удара зависит от диодности [2] устройства. И, хотя возможность использования диодов для защиты водоотливных установок (рис. 1) никем не оспаривается, отсутствие четких рекомендаций по выбору основных параметров торозит их применение.

Анализ последних исследований. Как известно [3, 4], защита водоотливных установок от гидравлического удара является актуальной задачей. В работе [5] показано расчетами на модели, что гидравлический диод в принципе может служить средством защиты водоотливных установок от гидравлического удара. При этом предполагается, что сам диод является безынерционным звеном. Такое предположение вполне допустимо, когда речь идет о гидравлических диодах, сделанных, например, на базе обратного клапана. Время срабатывания обратного клапана в рассматриваемых условиях не превышает 0,1 с, что на порядок меньше фазы гидравлического удара и не влияет существенно на процесс. Постоянная времени вихревого диода [1] (рис. 2) может изменяться от 0,5 с до 1 с и более. Очевидно значимое влияние инерционности характеристики вихревого диода на качество переходного процесса. Кроме того, обычно пренебрегают прямым сопротивлением вихревого диода, которое может оказывать определенное влияние на параметры рабочего режима насоса (рис. 3) и экономическую целесообразность применения рассматриваемого метода защиты в целом.

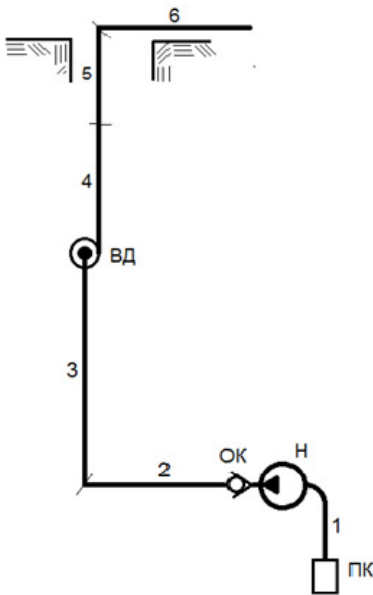


Рис. 1 – Схема водоотливной установки: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – участки водоотливного трубопровода, ВД – вихревой диод, ОК – обратный клапан, Н – насос, ПК – приемный клапан.

Постановка задачи. На основании изложенного была поставлена цель: установить на конкретном примере степень влияния инерционности и размеров вихревого диода на повышение давления при переходном процессе, а так же оценить энергетические потери при этом.

Математическая модель и результаты моделирования. Как отмечается в статье [2], вихревой диод, который используется в качестве средства защиты от гидравлических ударов, можно рассматривать как *черный ящик*, который характеризуется переменным гидравлическим сопротивлением и только двумя параметрами: максимальным сопротив-

лением при обратном течении жидкости a_{\max} и временем его достижения T_r (постоянная времени).

Качественный вид зависимости гидравлического сопротивления вихревого диода от времени показан на рис. 2 (кривая 1). Очевидно, что эта зависимость аппроксимируется ломаной линией, состоящей из двух участков, и её можно считать идеальной характеристикой вихревого диода, которая, как отмечалось выше, может быть задана величиной двух параметров – a_{\max} , T_r и значением гидравлического сопротивления вихревого диода при прямом течении жидкости a_{\min} .

Для проведения дальнейшего анализа множество параметров a_{\min} , T_r , a_{\max} целесообразно заменить на эквивалентные параметры a_{\min} , T_r , D_{vd} , где D_{vd} – диодность вихревого гидравлического диода $D_{vd} = a_{\max} / a_{\min}$. Очевидно, что чем выше диодность D_{vd} и меньше T_r , тем эффективнее вихревой диод как средство защиты от гидравлических ударов. Однако, как отмечено выше и показано в результате имитационного моделирования [1], максимальное значение D_{vd} достигает сорока, а минимальное значение T_r равно 0,5 секунд.

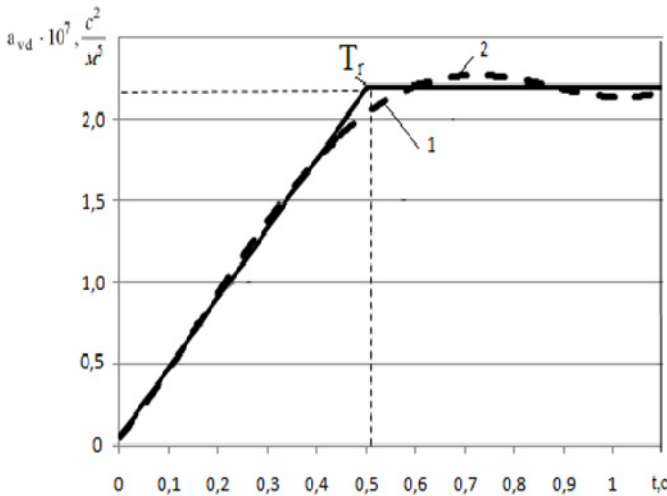


Рис. 2 – Зависимости гидравлического сопротивления вихревого диода с постоянной времени $T_r = 0,5$ с и диодностью $D_{vd} = 40$ от времени (1 – реальная характеристика; 2 – идеальная характеристика).

Прежде чем определить влияние этих параметров (D_{vd} , T_r) на характер динамических процессов в защищаемой водоотливной установке следует отметить, что величина a_{\min} влияет на параметры стационарного режима её работы. Чем меньше a_{\min} , тем меньше это влияние. Величину гидравличе-

ского сопротивления a_{\min} целесообразно определить через эквивалентный диаметр местного отверстия с сопротивлением, соответствующим гидравлическому сопротивлению вихревого диода при прямом течении жидкости D_{\min} .

Степень этого влияния можно оценить тремя безразмерными характеристиками:

- величиной относительного изменения стационарного расхода $\Delta Q_0 = Q_0 / \overline{Q_0}$, где соответственно $\overline{Q_0}, Q_0$ стационарный расход в незащищенной и защищенной вихревым диодом водоотливной установке;
- величиной удельной энергии потока жидкости в трубопроводе водоотливной установки $E_{\text{вд}} = N_0 \overline{Q_0} / Q_0 \overline{N_0}$, где $\overline{N_0}, N_0$ – мощности расходуемые на транспортировку жидкости в защищенной и незащищенной водоотливной установке в стационарном режиме работы;
- величиной относительного повышения давления при внезапном отключении насоса в защищенной вихревым диодом водоотливной установке $\Delta p = p_{\max} / p_0$, где p_{\max}, p_0 , соответственно, максимальное давление при переходном процессе и давление в начале трубопровода в стационарном режиме работы.

На рис. 3 показаны соответствующие графики. Они получены для водоотливной установки с параметрами, приведенными в [2].

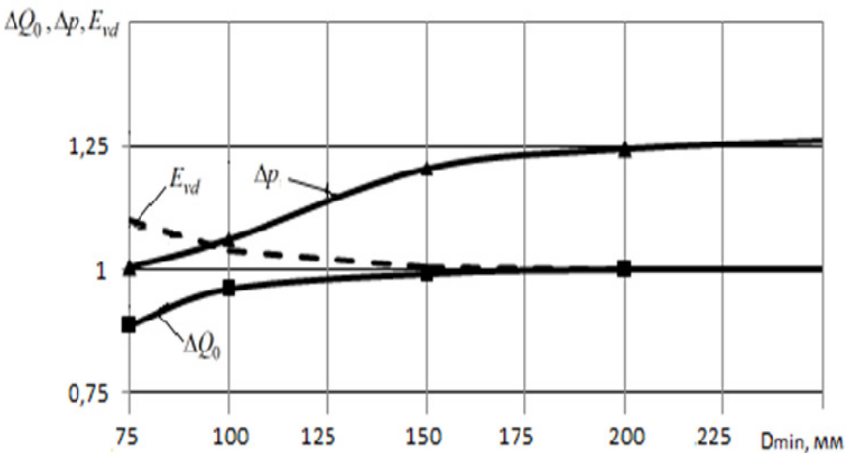


Рис. 3 – Зависимости величин $\Delta Q_0, \Delta p, E_{\text{вд}}$ в защищенном вихревым диодом трубопроводе от его прямого гидравлического сопротивления с эквивалентным диаметром D_{\min} (диодность $40T_r = 0,5$ с).

Графики на рис. 4 показывают, что вихревой диод с $D_{\min} = 125$ мм обеспечивает снижение относительного повышения давления при внезапном отключении насоса водоотливной установки до допустимого уровня без замет-

ного влияния на параметры стационарного режима работы (рис. 2). Однако график на рис. 4 показывает, что качественного изменения характера переходного процесса в этом случае не происходит, хотя вихревой диод обладает максимально возможными параметрами ($T_{vd} = 0,5$ с, $D_{vd} = 40$). Поэтому при дальнейших расчетах рассматривается вихревой диод с $D_{min} = 100$ мм, установка которого уменьшает расход в стационарном режиме работы на 5%, однако позволяет получить аperiodический переходный процесс в трубопроводе, а значит, обеспечить надежную защиту от гидравлического удара.

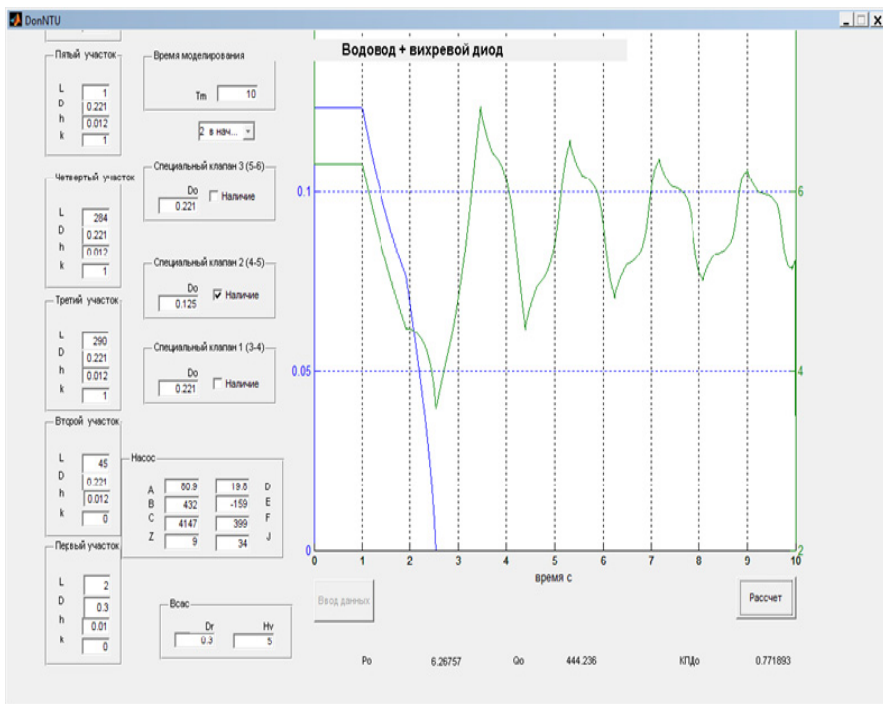


Рис. 4 – Изменение давления и расхода в начале трубопровода водоотливной установки (переходный процесс в защищенном трубопроводе $T_{vd} = 0,5$ с, $D_{vd} = 40$, $D_{min} = 125$ мм).

Определим граничные условия в точке установки вихревого диода. При этом будем считать, что зависимость гидравлического сопротивления вихревого диода от времени, показанная на рис. 2 и полученная в стационарных режимах работы устройства будет справедливой и при быстрых изменениях расхода жидкости. Кроме того, будем предполагать, что при использовании вихревого диода для защиты водоотливных установок не возникают режимы работы, рассмотренные в [1], когда со значительным увеличением отрица-

тельного расхода сопротивление вихревого диода уменьшается, поскольку в трубопроводах водоотливных установок скорость течения жидкости не превышает 3 м/с [3, 4] и такие режимы не возникают.

Итак, с учетом принятых допущений получим искомую систему уравнений. Если vd номер участка, в конце которого установлен диод, а длина этого участка L_{vd} , тогда:

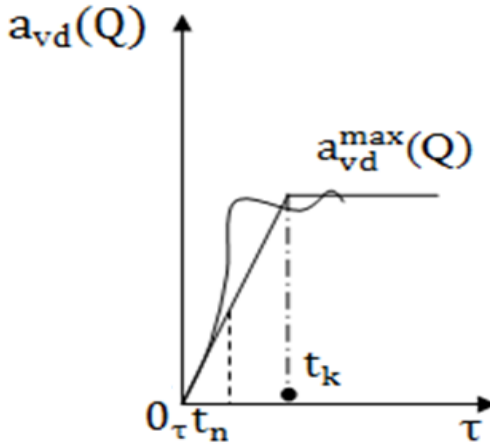


Рис. 5–Зависимости гидравлического сопротивления вихревого диода от времени в виртуальной системе координат.

$$Q_{vd}(L_{vd}, t) = Q_{vd+1}(0, t), \quad (1)$$

$$p_{vd}(L_{vd}, t) = \begin{cases} p_{vd+1}(0, 1) + a_{\min} Q_{vd+1}^2(0, 1), & \text{если } Q_{vd+1}(0, t) \geq 0; \\ p_{vd+1}(0, t) - a_{vd}(\tau) Q_{vd+1}^2(0, 1), & \text{если } Q_{vd+1}(0, t) < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение (1) указывает на то, что мгновенные значения расхода до и после вихревого диода считаются одинаковым. Система уравнений (2) показывает, что прямое сопротивление вихревого диода при расчетах принимается равным a_{\min} , а для определения обратного сопротивления при каждом случае обратного течения жидкости, с учетом особенностей динамических процессов в вихревых диодах [1], вводятся локальные системы координат с осями координат – $a_{vd}(\tau)$, и осями абсцисс τ . Момент времени $\tau = 0$ определяется из условия – $Q_{vd+1}(0, t) < 0$.

Каждая такая локальная система координат существует в течении ограниченного интервала времени (3):

$$t_n \leq \tau \leq t_k. \quad (3)$$

Моменты t_n, t_k можно найти из условий (4):

$$Q_{vd+1}(0, t_n) < 0 \text{ и } Q_{vd+1}(0, t_n + t_k) \geq 0. \quad (4)$$

Таким образом, текущее значение величины сопротивления в локальной системе координат $a_{vd}(\tau)$, определяется либо из дифференциального уравнения

$$\frac{da_{vd}(\tau)}{d\tau} = a_{\min} \frac{D_{vd} - 1}{T_{vd}}, \quad (5)$$

а в случае, если сопротивления вихревого диода меньше максимально возможного, то из условий:

$$a_{vd}(\tau) < a_{\max} = a_{\min} D_{vd}, \quad (6)$$

$$\text{либо } a_{vd}(\tau) \equiv a_{\max}. \quad (7)$$

Решение дифференциального уравнения (5) может быть найдено следующим образом:

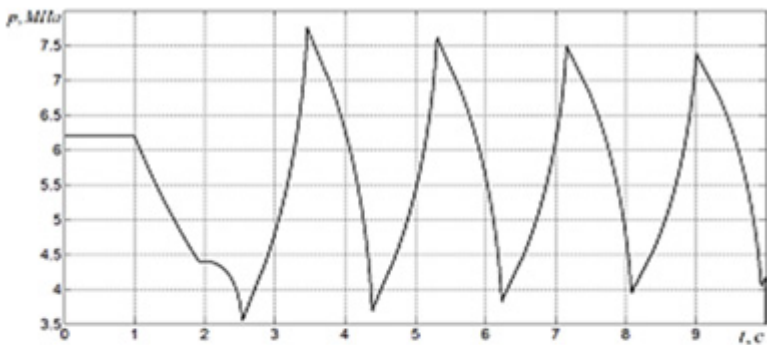
$$a_{vd}(\tau) = a_{vd}(\tau - \Delta t) + a_{\min} ((D_{vd} - 1) / T_{vd}) \Delta t.$$

Величина $a_{vd}(\tau - \Delta t)$ известна из результатов расчетов, а a_{\min} , D_{vd} , T_{vd} могут быть найдены из зависимости гидравлического сопротивления вихревого диода от времени (рис. 2). Далее проверяется выполнение условия (6). Если оно не выполняется, то используется уравнение (7).

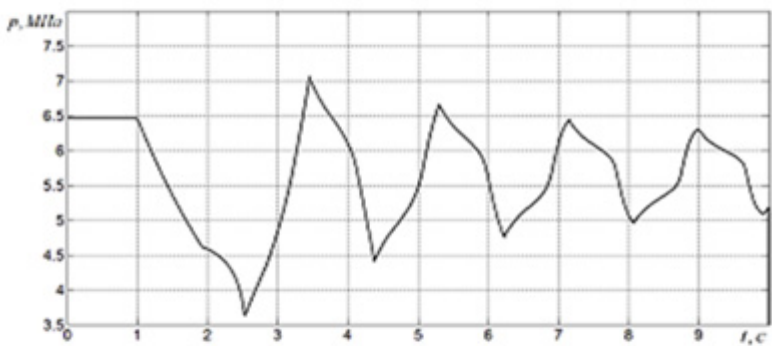
Таким образом, определяется текущее значение величины $a_{vd}(\tau)$, подставив которое в систему уравнений (1, 2) с учетом уравнений, описывающих состояние потока жидкости на прямой и обратной характеристиках [8], вычисляется состояние потока жидкости в точке установки вихревого диода.

Для следующего момента времени процедуры повторяется до тех пор, пока $\tau \leq t_k$. (Δt – шаг по времени в основной сетке характеристик при расчете гидравлического удара методом характеристик [8]).

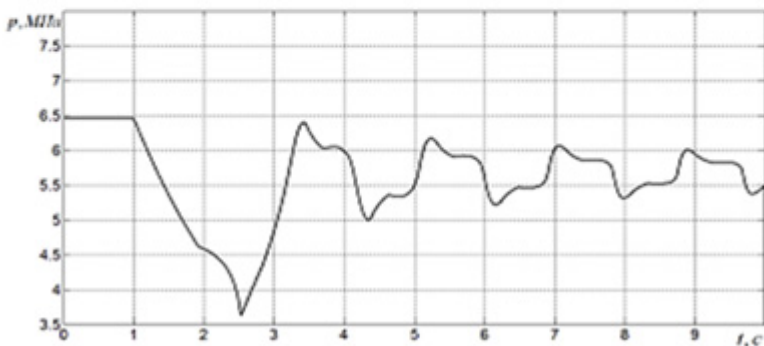
Из приведенной выше системы уравнений следует, что при выборе параметров вихревого диода для защиты какой-либо водоотливной установки от гидравлических ударов необходимо определить два параметра – T_{vd} и D_{vd} . Значимость влияния этих параметров на характер динамических процессов отражают графики, показанные на рис. 6. Из этих графиков видно, что вихревой диод с предельно достижимыми для устройств этого типа параметрами ($T_{vd} = 0,5$ с, $D_{vd} = 40$) с $D_{\min} = 100$ мм обеспечивает эффективную защиту рассматриваемой водоотливной установки. Однако, создание такого диода проблематично. Кроме того, остаётся открытым вопрос о влиянии отклонения параметров вихревого диода на характеристики динамических процессов. Из рассмотренных выше уравнений следует, что величина относительного повышения давления при внезапном отключении насоса в защищенной вихревым диодом водоотливной установке зависит от диодности D_{vd} и времени разгона жидкости T_{vd} при определённом значении D_{\min} . На рис. 7 показаны линии уровня этой функции. Из этих графиков видно, например, что при увеличении времени разгона жидкости T_{vd} до 0,55 с и уменьшении диодности с 40 до 35 существенного изменения качества переходного процесса не происходит.



a



b



в

Рис. 6 – Изменение давления в начале трубопровода водоотливной установки *a* – гидравлический удар в незащищенном трубопроводе, *б* – гидравлический удар в защищенном трубопроводе $T_{vd} = 0,9$ с, $D_{vd} = 20$, *в* – переходный процесс в защищенном трубопроводе $T_{vd} = 0,5$ с, $D_{vd} = 40$.

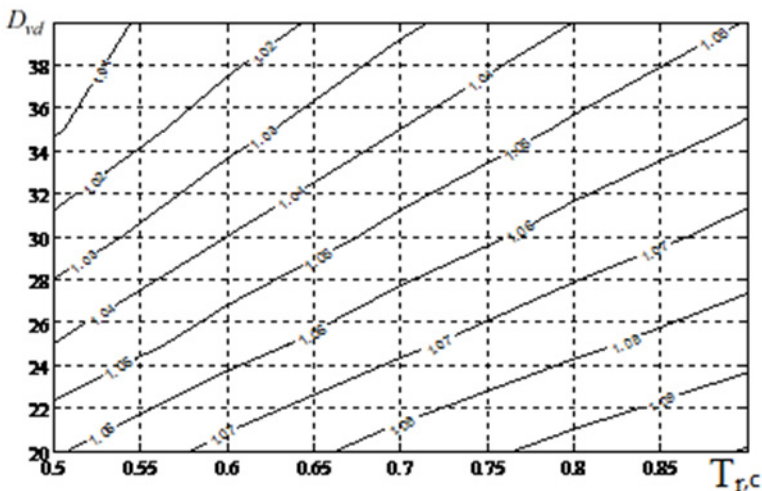


Рис. 7 – Изменение относительного повышения давления в защищенной вихревым диодом водоотливной установке в функции диодности и постоянной времени.

Выводы. Таким образом, разработана методика учета основных инерционных свойств вихревого диода, позволяющая в программном комплексе MatLab усовершенствовать модель переходного процесса в напорном трубопроводе шахтной водоотливной установки. Доказано, что основными параметрами вихревого диода, определяющими его способность эффективно гасить гидравлические удары, следует считать диодность, прямое гидравлическое сопротивление и время разгона жидкости (постоянную времени). Подтверждено, что инерционные свойства диода оказывают в целом негативное влияние на качество управляемых переходных процессов. Показано, что изменением прямого сопротивления вихревого диода (при неизменной диодности) всегда можно достигнуть гашения гидравлического удара в водоотливной установке, однако, при этом будут расти удельные энергозатраты на транспорт жидкости.

Перспективы дальнейших исследований. Дальнейшие исследования следует вести в направлении обобщения полученных результатов и экспериментальной проверки модели переходного процесса в защищенном напорном трубопроводе шахтной водоотливной установки.

Список литературы: 1. Кононенко А.П., Оверко М.В. Исследование динамики струйного диода // XIX міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – Кіровоград, –2014. – С. 48 2. Оверко В.М., Овсянников В.П. Повышение надежности водоотливных установок, защищенных гидравлическими диодами // Наукові праці Донецького державного технічного університету. – 2010. – Вип. (18) 172. – С. 226 – 233. 3. Попов В.М. Рудничные водоотливные установки. – М.: Недра, 1972. – 340 с. 4. Гейер В.Г., Тимошенко Г.М. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки // Учебник для вузов. – М. – Недра, 1987. – 270 с. 5. Кононе-

нко А.П., Овсянников В.П., Оверко В.М., Оверко М.В. Предотвращение гидравлического удара расположением гидродиода на выходном участке вертикального трубопровода // Наукові праці Донецького державного технічного університету. – 2014. – Вип. (2) 28. – С. 226 – 233. 6. Кононенко А.П., Овсянников В.П., Оверко М.В. Анализ динамических процессов в параллельно включенных трубопроводах водоотливной установки // Наукові праці Донецького державного технічного університету. – 2010. – Вип. (18) 172. – С. 226 – 233. 7. Кононенко А.П., Овсянников В.П., Кулик С.И. Совершенствование гидроимпульсаторов изменением гидравлических параметров трубопровода / В.П.Овсянников. – Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – №5 (979) – С. 119 – 123. 8. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kononenko, A. P., and M. V. Overko. "Issledovanie dinamiki strujnogo dioda." *XIX mizhnarodna naukovno-tehniczna konferencija "Gidroaeromehanika v inzhenernij praktici."* Kirovograd. 2014. Print. 2. Overko, V. M., and V. P. Ovsjannikov. "Povyshenie nadezhnosti vodootlivnyh ustanovok, zashhishhjonnnyh gidravlichesкими diodami." *Naukovi praci Donec'kogo derzhavnogo tehnicnogo universytetu.* No. (18) 172. 2010. 226–233. Print. 3. Popov, V. M. *Rudnichnye vodootlivnye ustanovki.* Moscow: Nedra, 1972. Print. 4. Gejer, V. G., and G. M. Timoshenko. *Shahitnye ventiljatornye i vodootlivnye ustanovki. Uchebnik dlja vuzov.* Moscow: Nedra, 1987. Print. 5. Kononenko, A. P., et al. "Predotvrashhenie gidravlichesкого udara raspolozheniem gidrodioda na vyhodnom uchastke vertikal'nogo truboprovoda." *Naukovi praci Donec'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu.* No. (2) 28. 2014. 226–233. Print. 6. Kononenko, A. P., V. P. Ovsjannikov and M. V. Overko. "Analiz dinamicheskikh processov v paralel'no vkljuchennyh truboprovodah vodootlivnoj ustanovki." *Naukovi praci Donec'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu.* No. (18) 172. 2010. 226–233. Print. 7. Kononenko, A. P., V. P. Ovsjannikov and S. I. Kulik. "Sovershenstvovanie gidroimpul'satorov izmeneniem gidravlichesких parametrov truboprovoda." *Visnyk NTU «HPI».* No. 5 (979). 2013. 119–123. Print. 8. Foks, D. A. *Gidravlichesкij analiz neustanovivshegosja techenija v truboprovodah.* Moscow: Energoizdat, 1981. Print.

Поступила (received) 27.12.2014