

УДК 519.876.5:622.531

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ, АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ ВЫБОРА
ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУДАРНЫХ СИСТЕМ**

Л. В. Городилов, Д. В. Вагин, Т. Б. Распутина

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: gor@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены методика и алгоритм выбора основных параметров гидроударной системы объемного типа. Методика основана на результатах размерного анализа уравнений системы, выбора критериев подобия и расчетов в их пространстве безразмерных выходных характеристик. В программе пользователю предоставляется возможность задать набор стартовых параметров и характеристик гидроударной системы в виде их значений и возможных ограничений, а также выбрать табличные значения для безразмерных характеристик, по которым в дальнейшем, используя формулы критериев подобия, будет осуществляться подбор ее вариантов. Для выбранной гидроударной системы проводится расчет геометрических параметров бойка. Программа разработана на языке Java, имеет графический многооконный интерфейс и включает меню, панель инструментов, окна задания параметров и ограничений, ввода входных данных, результатов вычислений, расчета размеров бойка и вывода графиков динамических характеристик предельных циклов системы.

Гидроударная система, критерии подобия, характеристики предельных циклов, графический интерфейс

DOI: 10.15372/FTPRPI20170508

Приступая к проектированию гидроударной машины, необходимо знать физические и геометрические параметры ее основных элементов при заданных режимных характеристиках. В некоторых случаях важно иметь представление о динамике системы, так как от этого может зависеть надежность и работоспособность ее отдельных устройств. В настоящее время существует большой набор программ, например SimulationX, Automation Studio, SIMULINK пакета MATLAB [1–4] и др., позволяющих проводить имитационное моделирование технических систем, включающих гидравлические, пневматические и механические элементы, к которым относятся и гидроударные системы. Их использование при выборе параметров системы и расчете ее динамики возможно, но требует большой подготовительной работы по разработке и составлению соответствующих гидромеханических схем. Кроме того, как правило, имеется большое количество вариантов исполнения проекта, из которых по определенным условиям следует выбрать наиболее подходящий. Необходим значительный объем численных расчетов, что даже на современных высокопроизводительных компьютерах занимает много вычислительного времени.

Сделать это достаточно сложно, поэтому разработка программы, позволяющей автоматизировать процесс на этапе эскизного проектирования и выбрать наиболее приемлемый вариант, является актуальной научно-технической задачей. В настоящей работе излагается алгоритм и методика такого выбора, описание структуры и интерфейса программы, разработанной на языке Java, для гидроударных системы объемного типа.

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ

На первом этапе разрабатывают математическую модель гидроударной системы, включающей ее основные, характеризующие физическую сущность, элементы. Затем с использованием метода аналогичности [5] проводят размерный анализ и выбирают динамические критерии подобия. В пространстве критериев численно рассчитывают таблицы безразмерных выходных характеристик предельных циклов системы: предупредительной скорости и максимального размаха колебаний бойка, времени цикла, КПД и мощности системы. Подробно этапы исследования для систем объемного типа описаны в [6–8].

Далее, используя полученные таблицы безразмерных критериев и характеристик, формулы критериев подобия и переходя от безразмерных переменных к размерным и задаваясь определенным числом параметров, можно определить все основные размерные параметры и характеристики. По установленным техническим заданием ограничениям на остальные параметры и характеристики системы отбирают подходящие варианты ее исполнения. Один из элементов программы — расчет по полученным данным при известной конфигурации бойка его геометрических параметров.

Таким образом, программа реализует как прямой расчет — нахождение характеристик предельных циклов по заданным параметрам гидроударного устройства, так и решение обратной задачи — нахождение параметров гидроударного устройства по заданным характеристикам предельных циклов. С методологической точки зрения решение обратной задачи является так называемым “сканером”, т. е. требует предварительного выполнения множества прямых расчетов, покрывающих всю область определения параметров гидроударного устройства.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ, ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассмотрим в качестве примера гидроударную систему двухстороннего действия объемного типа с газожидкостным аккумулятором энергии [6] (рис. 1). Это система “с задержкой” движения бойка [9] — его обратный ход начинается при давлении в системе, превышающем некоторую величину, называемую далее *давлением задержки* — $p_{[3]}$.

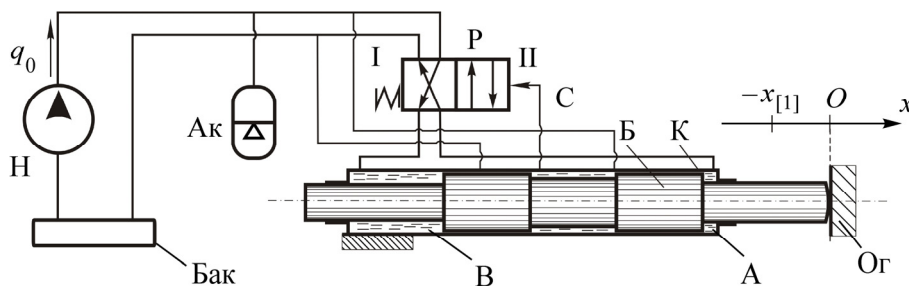


Рис. 1. Принципиальная схема гидроударной системы: Н — насос; Ак — газожидкостный аккумулятор; Р — распределитель; Б — боек; К — корпус ударного узла (УУ); Ог — ограничитель; А, В — соответственно камеры обратного и прямого хода УУ; С — управляющая линия распределителя Р

Устройства и элементы системы: насос с идеальной подачей q_0 , номинальным давлением p_n и объемным КПД η_0 ; газожидкостный аккумулятор объемом V_n при давлении p_n , показатель политропы газа γ ; боек массой m с площадями со сторон камер А и В соответственно S_A и S_B .

Предполагается, что потери на гидравлических сопротивлениях и на трение в паре “бойк – корпус” отсутствуют, распределитель переключается мгновенно и без потерь, жидкость — идеальная и несжимаемая.

В исходном состоянии (рис. 1) распределитель Р находится в положении I, боек Б давлением жидкости в камере В прижат к ограничителю Ог и неподвижен. Жидкость поступает в аккумулятор, давление в нем и в системе повышается, при достижении им величины $p_{[3]}$ (давления задержки) распределитель переходит в положение II — боек под действием давления жидкости в камере А начинает движение влево. После достижения координаты $x_{[1]}$ — *длины фазы обратного хода* — распределитель возвращается в положение I, боек давлением жидкости в камере В сначала тормозится, а затем двигается вправо до координаты $x = 0$. В момент взаимодействия с ограничителем боек останавливается, цикл повторяется.

Итак, имеем всего 10 размерных параметров системы: $q_0, p_n, \eta_0, m, x_{[1]}, S_A, S_B, V_n, \gamma, p_{[3]}$.

Характеристики системы: предупредительная скорость v_1^* и максимальный размах колебаний X_{\max}^* бойка, время цикла T_C^* , минимальное и максимальное давления за цикл p_{\min}^*, p_{\max}^* , КПД η , мощность N^* .

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

При переходе в уравнениях математической модели гидроударной системы [6] к безразмерным переменным и выборе динамических критериев подобия использовали метод аналогичности [5, 10]. В результате получены следующие параметры обезразмеривания:

$$z_0 = \frac{(1-\eta_0)^{1/\gamma} V_n}{\gamma q_0}, \quad z_1 = \frac{(1-\eta_0)^{1/\gamma} V_n}{\gamma S_*}, \quad z_2 = \frac{q_0}{S_*}, \quad z_3 = \frac{p_n}{1-\eta_0}, \quad (1)$$

и критерии подобия:

$$\sigma_0 = \frac{S_A}{S_B}, \quad \sigma_1 = \frac{(1-\eta_0)^{-1+1/\gamma}}{\gamma} \frac{p_n V_n}{m(q_0/S_*)^2}, \quad \bar{x}_{[1]} = \frac{1}{z_1} x_{[1]}, \quad \bar{p}_{[3]} = \frac{1}{z_3} p_{[3]}. \quad (2)$$

Вычисление размерных характеристик. В формулах (2) использовали 10 размерных параметров. Учитывая, что показатель политропы γ — величина постоянная, для определения всех параметров необходимо задать пять из них, которые будем называть исходными. После этого для каждой строки таблицы безразмерных параметров с помощью формул (2) вычисляли оставшиеся параметры, а с помощью формул (1) характеристики:

$$v_1^* = \bar{v}_1^* z_2, \quad X_{\max}^* = \bar{X}_{\max}^* z_1, \quad T_C^* = \bar{T}_C^* z_0, \quad p_m^* = \bar{p}_m^* z_3, \quad \bar{N}^*, \eta^*.$$

Затем из полной таблицы вычисленных параметров и характеристик отфильтровывали строки, которые удовлетворяют заданным условиям (техническому заданию на ударную машину).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ БОЙКА

Принято, что боек заданной конфигурации состоит из 5 частей (рис. 2), длину каждой из которых и диаметры d_1, d_3, d_5 можно определить через параметры $x_{[1]}, X_{\max}^*, S_A, S_B, D$ и коэффициенты длины k_1, k_2, k_3, k_4 ($D = d_2 = d_4$). Коэффициенты k_1 и k_4 находятся по нормативным документам фирм-изготовителей уплотнительных элементов для гидравлических агрегатов, например [11, 12], составленных по российским и международным стандартам. Коэффициенты k_2 и k_3 соответственно устанавливаются исходя из опыта эксплуатации ударных устройств и возможного отклонения величин перемещения бойка от расчетных.

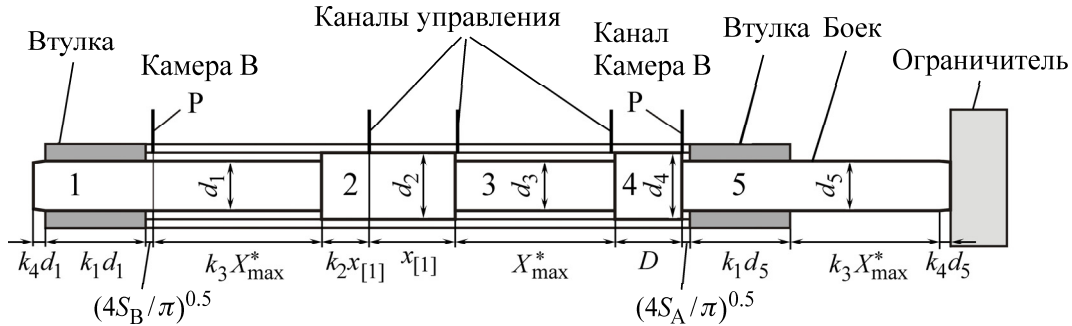


Рис. 2. Расчетная схема бойка

Масса бойка m равна сумме масс его частей:

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5, \quad (3)$$

каждую из которых можно рассчитать по формулам

$$m_k = \rho l_k \pi d_k^2 / 4 \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5), \quad (4)$$

где значения длин частей указаны на рис. 2: $d_1 = (D^2 - 4S_B / \pi)^{0.5}$, $d_3 = D - 0.003$, $d_5 = (D^2 - 4S_A / \pi)^{0.5}$. Подставляем их в уравнения (4), (4) в (3), в результате получаем нелинейное уравнение относительно диаметра бойка, решая которое, находим D и далее вычисляем все размеры бойка.

После округления значений диаметров и длин до целых (в мм) проводится проверочный расчет массы и площадей бойка на соответствие ранее полученным данным.

ПРИМЕР РАСЧЕТА И ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММЫ

Главное окно программы (рис. 3а) включает строку заголовка с кнопками свертывания, развертывания и закрытия, главное меню, панель инструментов и рабочее поле с полосами прокрутки, в котором в начальном состоянии отображается принципиальная схема гидроударного устройства [13].

Меню имеет три пункта: “Главная”, “Данные” и “Справка”, основная часть функций которых дублируется в кнопках Панели инструментов.

Панель инструментов содержит (слева направо) кнопку “Задать параметры”, список “Выбрать систему”, кнопки: “Загрузить параметры”, “Загрузить таблицы”, “Расчет выборки” (активна при загруженных таблицах и параметрах), “Проверочный расчет”, “Очистить расчет”, “Сохранить таблицу результатов” и “Сохранить параметры бойка”.

При выборе кнопки “Задать таблицы” происходит обращение к папке файлов-таблиц выбранной системы, можно выбрать один или все файлы и загрузить их.

Исходные параметры можно загрузить (кнопка “Загрузить параметры” загружает значения параметров последнего расчета) или задать (кнопка “Задать параметры”). При выборе последней кнопки появляется окно-таблица, в активные текстовые поля которого вводятся значения параметров (Значение) и ограничений на параметры и характеристики (Min значение, Max значение). При введении параметра (всего их для двухсторонней системы с задержкой должно быть 5) поля ограничений (Min и Max) становятся неактивными. После заполнения полей таблицы и нажатия кнопки “Загрузить и продолжить” введенные параметры сохраняются в памяти компьютера и на диске.

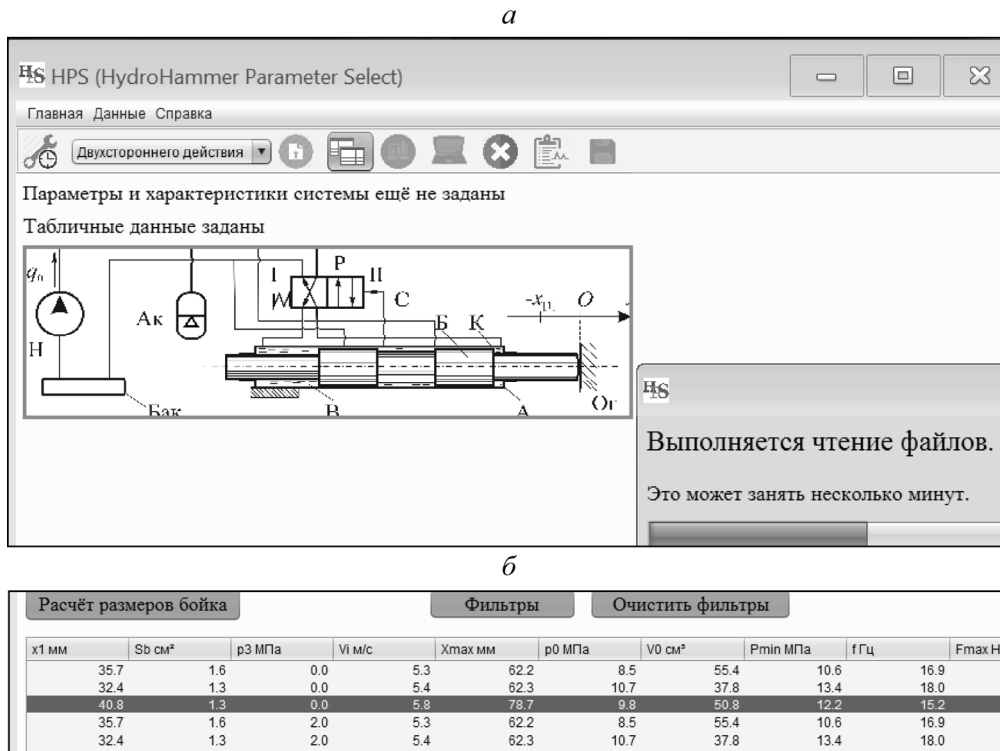


Рис. 3. Главное окно программы (а) и таблица параметров (б)

После задания таблиц, параметров и условий проводится расчет (кнопка “Расчет выборки”), в результате которого (в случае правильного задания параметров) в главном окне будет показана таблица отобранных параметров и характеристик системы (рис. 3б). Кнопка “Применить фильтры” позволяет настроить условия, накладываемые на параметры и характеристики столбцов таблицы (дополнительно к условиям окна “Задать параметры”), чтобы сократить количество строк таблицы до приемлемого уровня.

При нахождении в таблице приемлемого результата можно перейти к расчету размеров бойка. Для этого следует выделить строку с результатом и нажать кнопку “Расчет размеров бойка” (рис. 3б). Появится окно, в котором отобразится расчетная схема бойка (рис. 2), заданные и рассчитанные параметры бойка и поправочные коэффициенты, определяющие длины втулок и отдельных участков бойка. Коэффициенты можно изменить в соответствии с конкретными требованиями к конструкции устройства. Рекомендации по ним даны в справке программы. После нажатия на кнопку “Пересчитать параметры бойка” будет заполнена таблица размеров бойка и выведено в окно его изображение в масштабе (рис. 4).

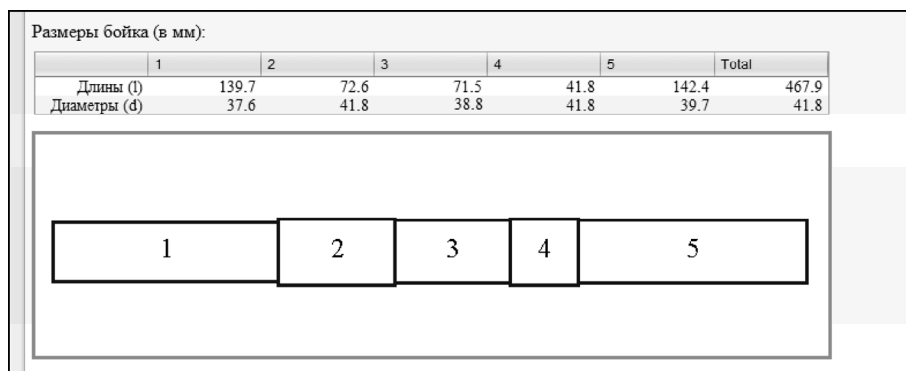


Рис. 4. Фрагмент окна расчета размеров бойка с его изображением в масштабе

В программе предусмотрен расчет динамики и выходных характеристик для уже полученных данных, при этом результаты выводятся в виде таблицы значений характеристик и графиков — теоретических осциллограмм зависимостей координаты и скорости бойка, давления в аккумуляторе в течение предельного цикла от времени. При нажатии на кнопку “Проверочный расчет” панели инструментов главного окна эта процедура будет выполнена и на монитор выведено окно с графиками, заданными и расчетными параметрами и характеристиками (рис. 5).

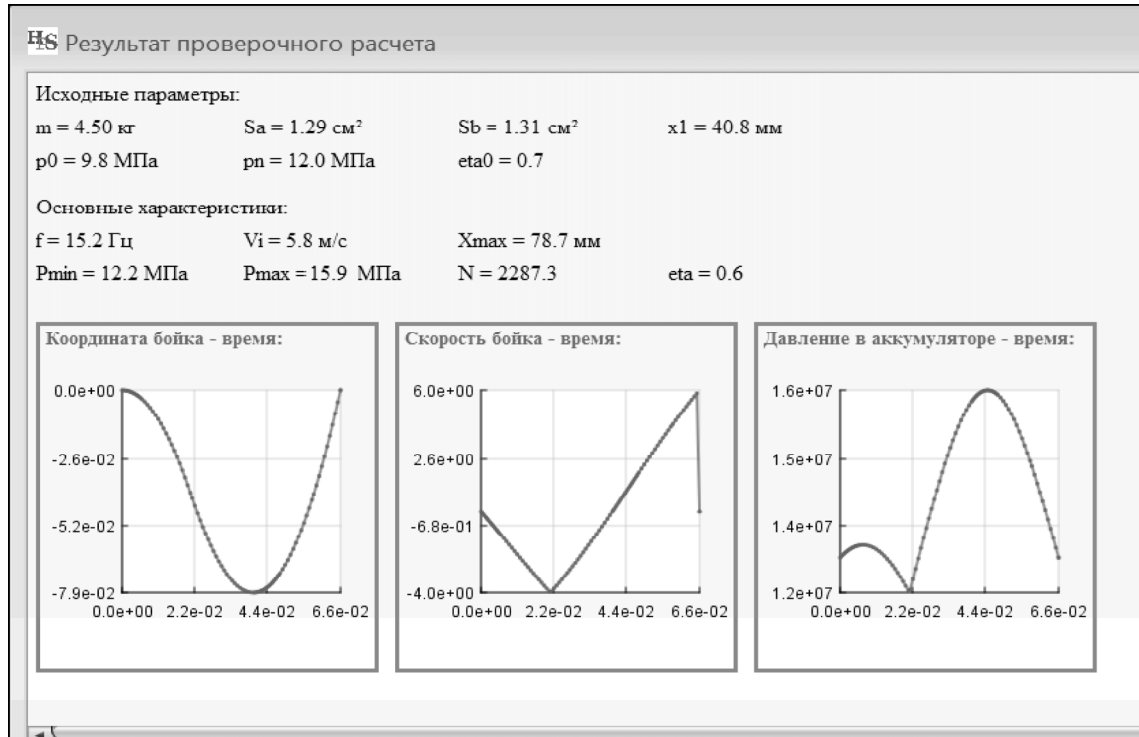


Рис. 5. Окно проверочного расчета и отображения графиков

ВЫВОДЫ

Представленная программа позволяет на начальном эскизном этапе проектирования выбирать основные параметры гидроударных систем объемного типа двухстороннего и одностороннего обратного и прямого действия. Получаемые при этом параметры и характеристики будут тем точнее отражать соответствующие значения реальной машины, чем меньше потери в ее гидравлических и механических элементах, т. е. чем совершеннее ее конструктивная реализация.

Методика выбора параметров, включающая размерный анализ уравнений, составление таблиц характеристик систем в безразмерном пространстве критериев подобия, задание части параметров и выбор остальных, может быть распространена и на другие перспективные виды гидроударных систем. Разработка новых модулей, реализующих процедуру выбора для других видов систем, добавление их в существующую объектно-ориентированную программу не представляет существенных сложностей.

Дальнейшее развитие программы предполагает добавление модулей, которые после предварительного выбора основных параметров гидроударной системы и детальной проработки ее конструкции способны разрабатывать для нее имитационную модель и проводить детальное моделирование режимов работы, включая заданное внешнее воздействие, а также оптимизировать параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Multi-domain system** simulation and modeling [Электронный ресурс]. URL: <http://www.itisim.com/simulationx/system-simulation> (дата обращения 30.08.2017).
2. **Automation Studio** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.automationstudio.com/> (дата обращения 30.08.2017).
3. **Терехин В. В.** Основы моделирования в MATLAB. Ч. 2. Simulink: учеб. пособие. — Новокузнецк: РИО НФИ КемГУ, 2004. — 304 с.
4. **Гимадиев А. Г., Грешняков П. И., Сияков А. Ф.** LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в механических системах [Электронный ресурс]: учеб. пособие. — Самара: СамНЦ РАН, 2014. — 138 с. URL: <http://www.ssc.smr.ru/media/publications/978-5-93424-722-6.pdf> (дата обращения 30.08.2017).
5. **Мамонтов М. А.** Аналогичность. — М.: Изд-во МО СССР, 1971. — 46 с.
6. **Городилов Л. В.** Исследование динамики гидроударных объемных систем двухстороннего действия. Ч. I: Основные свойства // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 91–101.
7. **Городилов Л. В.** Исследование динамики гидроударных объемных систем обратного действия // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 91–96.
8. **Городилов Л. В.** Исследование динамики гидроударной объемной системы прямого действия // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2016. — № 2. — С. 46–52.
9. **Городилов Л. В., Фадеев П. Я.** Анализ и классификация эффективных конструктивных схем автоколебательных гидравлических ударных систем // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: труды конф. с участием иностр. ученых. — Т. 2. Машиноведение. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2007. — С. 71–79.
10. **Городилов Л. В.** Анализ рабочего цикла гидравлической ударной машины с применением критериев подобия // ФТПРПИ. — 2000. — № 5. — С. 70–76.
11. **Уплотнительные элементы** для гидравлических цилиндров и агрегатов. Каталог № 10.1 [Электронный ресурс]. RGC-trade — комплектующие для гидроцилиндра, штоковые и поршневые уплотнения. Изготовление любых уплотнений за час. URL: http://www.rgc-trade.com/upload/iblock/f4a/catalog_rgc-2016.pdf (дата обращения 13.06.2017).
12. **Гидравлические и пневматические манжеты**, уплотнения, сальники. Производство и продажа РТИ, КВЕРС [Электронный ресурс]. URL: <http://quers.ru/> (дата обращения 13.06.2017).
13. **Свидетельство** на программу для ЭВМ № 2017618817. Выбор параметров гидроударных систем объемного типа и расчет размеров бойка / Л. В. Городилов, Д. В. Вагин, Т. Б. Распутина, О. А. Пашина (РФ). Заявка № 2017615684. Дата поступления 15.06.2017; Дата регистр. 09.08.2017.

Поступила в редакцию 22/VI 2017