

УДК 621.225

DOI: 10.12737/article\_59b11cb6b73246.7500565

А.В. Пузанов, Е.А. Ершов

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ АКСИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНОЙ ГИДРОМАШИНЫ

Приведена методика расчета индикаторной диаграммы аксиально-плунжерной гидромашины на микроуровне с использованием программных комплексов *Autodesk Simulation*.

**Ключевые слова:** гидропривод, аксиально-поршневая гидромашина, моделирование, индикаторная диаграмма, CAE, CFD.

A.V. Puzanov, E.A. Yershov

## SIMULATION OF INDICATOR DIAGRAM OF AXIAL-PLUNGER HYDRO-MACHINE

The enforcement of hydraulic drives is defined by accuracy increase of computation procedures at the design of their elements. The indicated diagram of a hydro-machine is a vivid characteristic of product dynamic properties. The dynamic properties, reliability and life of drive on the whole depend upon the computation correctness.

The paper reports the procedure of the indicated diagram computation for a hydro-machine axial-plunger at the micro-level with the use of Autodesk Simulation program complexes.

**Key words:** hydraulic drive, axial-piston hydro-machine, simulation, indicated diagram, CAE, CFD.

Гидроприводостроение - современная, интенсивно развивающаяся отрасль машиностроения. Приводы с использованием гидродвигателей являются базовым элементом высокоэффективного оборудования с высокими удельной мощностью, быстродействием, экономичностью, интеграцией с цифровой системой управления и плавным регулированием во всем диапазоне скоростей выходного звена. Отмеченные преимущества определили широкое распространение гидравлических приводов в различных отраслях: станкостроении, металлургии, военной технике, нефтегазовой и перерабатывающей промышленности, сельском хозяйстве. Однако повышение мощности привода, как правило, за счет увеличения уровня рабочего давления (свыше 500 ат) приводит к усложнению конструктивных исполнений элементов привода и особенно гидромашин и, следовательно, к ужесточению требований к их проектированию и производству.

Одной из характеристик динамических качеств изделия является индикаторная диаграмма гидромашины. От корректности расчета этой характеристики и про-

изводственной реализации в «железе» зависят динамические свойства привода в целом.

Индикаторная диаграмма гидромашины (насоса или мотора) – это графическая зависимость давления в поршневой камере от времени (или от положения поршня). Она изображается в виде замкнутого цикла либо в виде графика зависимости от времени или перемещения. На рис. 1 показан наглядный пример индикаторной диаграммы, характерной для аксиально-поршневых гидромашин.

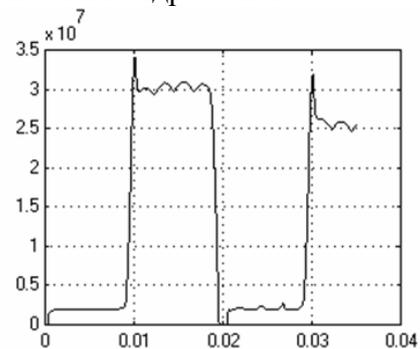


Рис. 1. Индикаторная диаграмма аксиально-поршневой гидромашины

При движении поршня из поршневой камеры (в процессе всасывания) давление в цилиндре насоса резко падает до давления всасывания  $p_B$ . Из-за податливости стенок цилиндра и сжимаемости жидкости линия перехода не вертикальна, а слегка наклонена и переходит затем в горизонтальную волнистую линию. Далее на всасывающей линии поддерживается постоянное давление, и линия остается практически горизонтальной на протяжении всего хода всасывания. При обратном движении поршня (в процессе нагнетания) давление в цилиндре от  $p_B$  увеличивается до давления  $p_H$  по прямой, наклон которой влево от вертикали объясняется теми же самыми причинами. Начало сжатия жидкости сопровождается колебаниями давления в цилиндре. В дальнейшем давление  $p_H$  остается практически неизменным на протяжении всего хода нагнетания. В нормальном рабочем цикле этот график будет повторяться [1].

Как и в любой динамичной системе, особый интерес представляют участки ин-

дикаторной диаграммы, отражающие смену давления в поршневой камере, т. е. в момент переноса поршневой камеры из области всасывания в область нагнетания и обратно. От характера этого переходного процесса зависят все основные характеристики гидромашины: подача (пульсация подачи) насоса (или расход мотора); объемный КПД гидромашины; нагрузки на механические элементы гидромашины; акустические характеристики и т.д.

Теоретические основы расчета детально рассмотрены в работе [1].

Аналитические зависимости, имитационные модели и результаты имитационного моделирования на макроуровне рассмотрены в работах [2; 3].

Типичная модель для расчета индикаторной диаграммы гидромашины представлена на **рис. 2**. В данном случае, в отличие от указанных работ, модель выполнена с использованием библиотек *MatLab/Simulink – SimHydraulic*, что позволяет применять ее в моделях приводов различного рода [4].

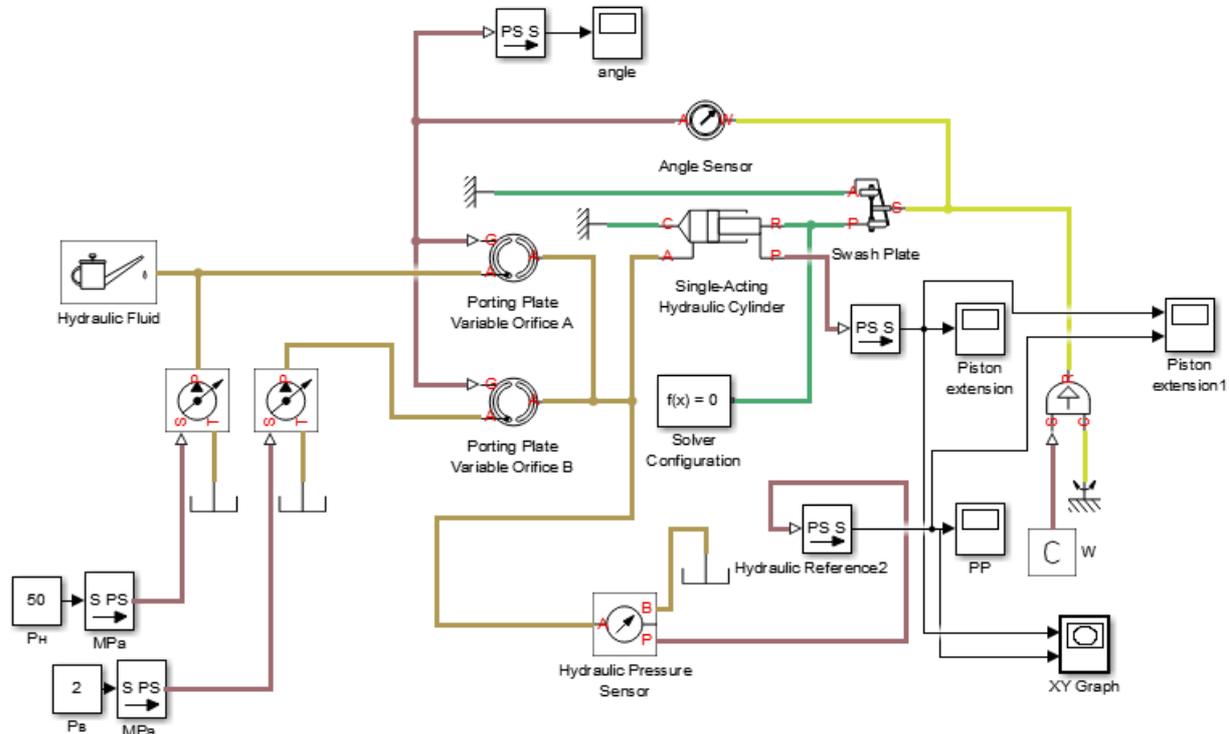
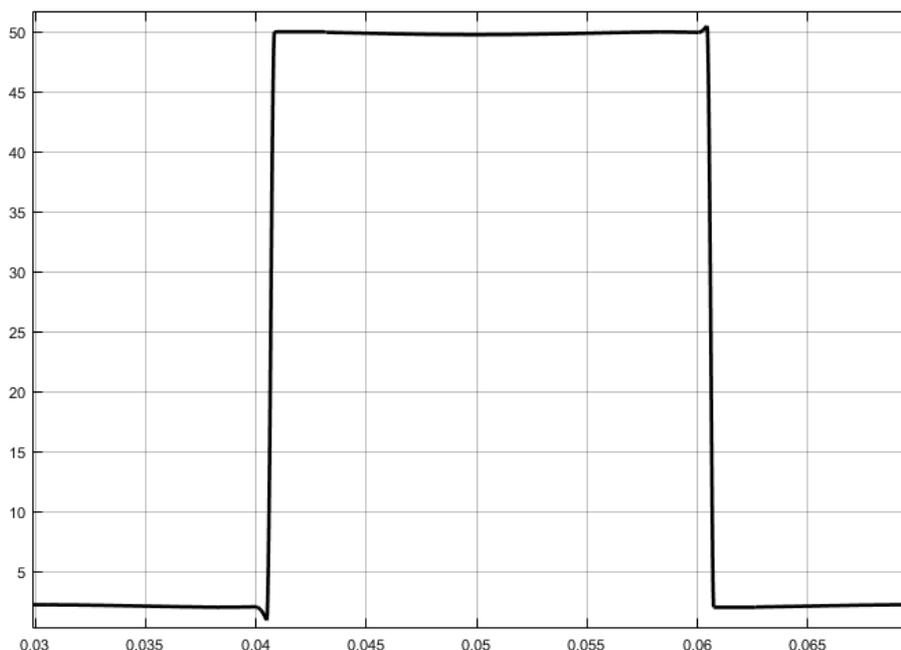


Рис. 2. Модель для расчета индикаторной диаграммы в *Matlab/Simulink*

На **рис. 3** показан результат расчета приведенной модели индикаторной диаграммы. На графике индикаторной диа-

граммы отслеживаются зоны забросов давления, описанные в работах [1 - 3].

Рис. 3. Результат расчета индикаторной диаграммы в *Matlab/Simulink*

В упомянутых работах также анализируются средства улучшения динамических характеристик гидромашин, в том числе на примере индикаторной диаграммы. Практически все эти приемы улучшения качества индикаторной диаграммы также могут быть проанализированы с использованием модели, приведенной на **рис. 2**.

В частности, одним из наиболее действенных средств улучшения динамики процесса распределения рабочей жидкости является проворот распределителя относительно точки кинематической нейтрали и выполнение усов (дросселирующих элементов) на границе зон нагнетания и всасывания.

Недостатки описанных подходов к рассмотрению и анализу индикаторной диаграммы (свойственные аналитическому и имитационному подходам) наиболее подробно рассмотрены и проанализированы авторами в работе [5]. При моделировании переходных процессов в гидроприводе (ГП) такими недостатками являются:

- невозможность учета как волновых процессов, сопровождающих переход цилиндров качающего узла из зоны всасывания в зону нагнетания и наоборот, так и волновых процессов, порождаемых в на-

порной линии ГП воздействием внешних устройств;

– трудности в описании изменения температуры рабочей жидкости в процессе работы ГП.

От себя добавим, что аналитически и имитационно крайне сложно описать геометрию конструктивных элементов, направленных на улучшение работы узла, тем более с учетом криволинейности зазоров и их изменения во времени.

В этой же работе авторами предлагается решение задачи расчета и анализа индикаторной диаграммы посредством моделирования на микроуровне в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*. При этом авторами учитывались турбулентность и диссипация энергии рабочей жидкости с учетом теплопроводности, движение качающего узла (правда, не вращательное, а поступательное).

Перед нами стояла глобальная задача форсирования аксиально-плунжерной гидромашин (АПГМ). Форсирование по давлению явилось следствием повышения момента на приводном валу, что, в свою очередь, вызвано исключением промежуточного звена, повышающего мощность привода (редуктора).

Попутной проблемой являлась задача стабилизации колебательности давления в

гидросистеме, вносимой в работу гидромашины распределительным узлом и характеризующейся индикаторной диаграммой.

Нами предлагается решение задачи расчета индикаторной диаграммы на микроуровне в программном комплексе, включающем в себя средство геометрического прототипирования модели *Autodesk Inventor*, средство гидромеханического анализа *Autodesk Simulation CFD* и средство расчета напряженно-деформированного состояния конструкций *Autodesk Simulation Mechanical*. Использование данного состава программных комплексов позволяет за

счет применения адаптивных моделей сократить время проработки варианта конструктивного исполнения с учетом технологичности его производства.

Кроме вышеописанного, в нашей модели отражен учет зазоров, самостабилизации гидростатической опоры плунжера и распределительного узла, а также изменения параметров течения рабочей жидкости в зазорах гидромашины при деформации конструктивных элементов, образующих сопряженные поверхности [6; 7].

Исходная геометрическая модель представлена на **рис. 4**.

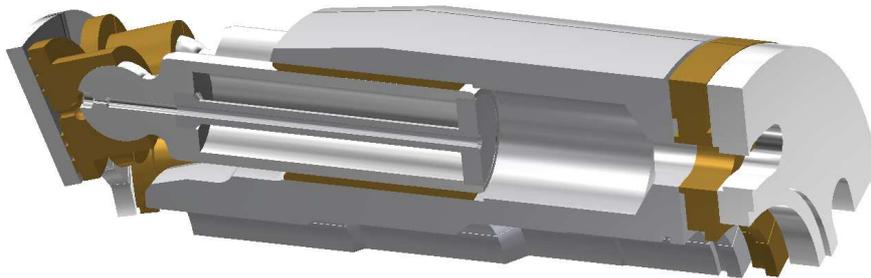


Рис. 4. Исходная модель АПГМ (показан сектор)

В качестве исходных данных нами были приняты: давление в полости нагнетания  $p_n=50$  МПа, давление в полости всасывания  $p_b=2$  МПа, внутрикорпусное давление 0,5 МПа; температура рабочей жидкости (в установившемся состоянии)  $50^\circ\text{C}$ ; масло МГЕ-10А (с учетом зависимости вязкости от температуры).

Для упрощения моделирования привод вращения применен для распределителя (на детали и объем жидкости, вращающиеся относительно оси вала в реальной гидромашине, приложены соответствующие центробежные нагрузки).

Кроме того, для плунжера с гидростатической опорой разрешены перемеще-

ния под действием потока жидкости – для получения и учета эффекта гидростатической самостабилизации.

В данной работе не отражено влияние деформации элементов гидромашины под действием давления рабочей жидкости. Этой теме будет посвящена отдельная статья.

После CFD-моделирования получены следующие результаты. На **рис. 5** показана картина распределения давления рабочей жидкости по каналам и зазорам ходовой части гидромашины с векторами скоростей потока (в данном случае – расхода утечек). На рисунке для наглядности все твердотельные элементы конструкции погашены.

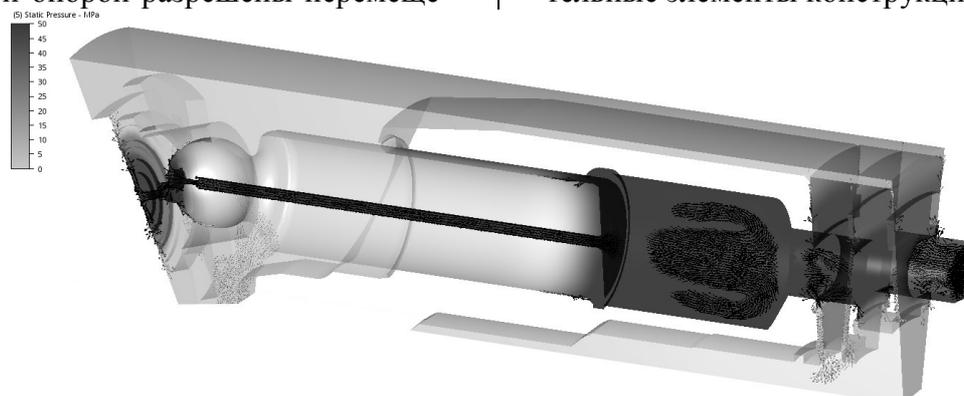


Рис. 5. Результат CFD-анализа ходовой части АПГМ (показан сектор)

На **рис. 6 - 8** приведены картины распределения давления жидкости в плоскости, проходящей через вершины усов распределителя, в промежуточных поло-

жениях – от момента открытия канала по усу до момента пересечения с основным окном распределителя.

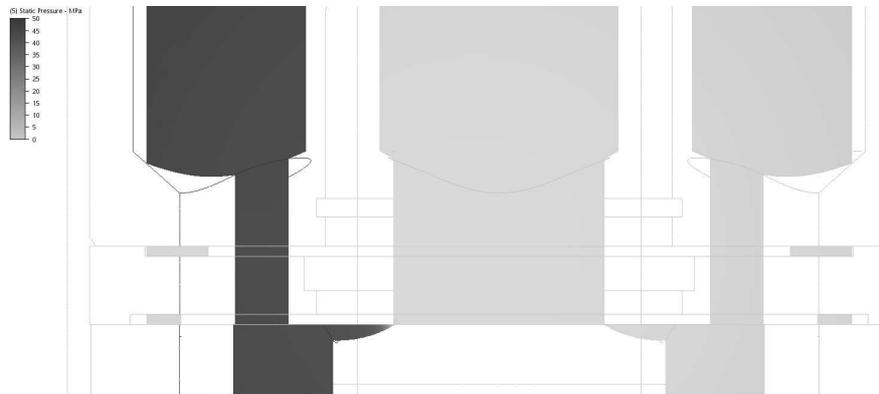


Рис. 6. Результат CFD-анализа ходовой части АПГМ (в плоскости по вершинам усов) для точки кинематической нейтрали

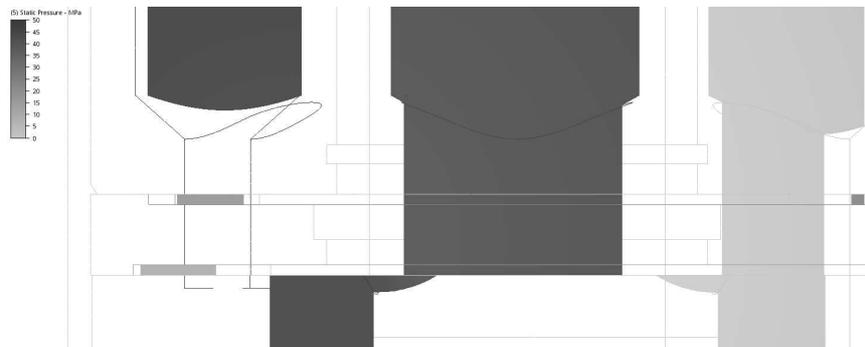


Рис. 7. Результат CFD-анализа ходовой части АПГМ (в плоскости по вершинам усов) для точки середины уса

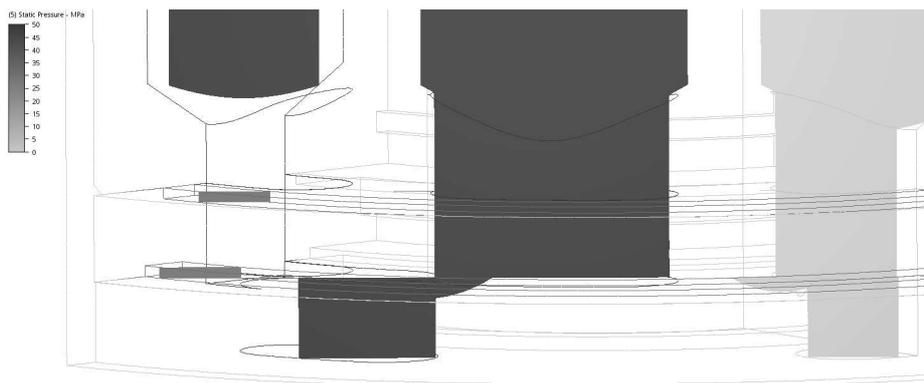


Рис. 8. Результат CFD-анализа ходовой части АПГМ (в плоскости по вершинам усов) для точки в основании уса

На **рис. 9** представлен обобщенный результат моделирования индикаторной диаграммы варианта конструктивной проработки распределительного узла (не

окончательного – для наглядности влияния конструктивных элементов на характер диаграммы).

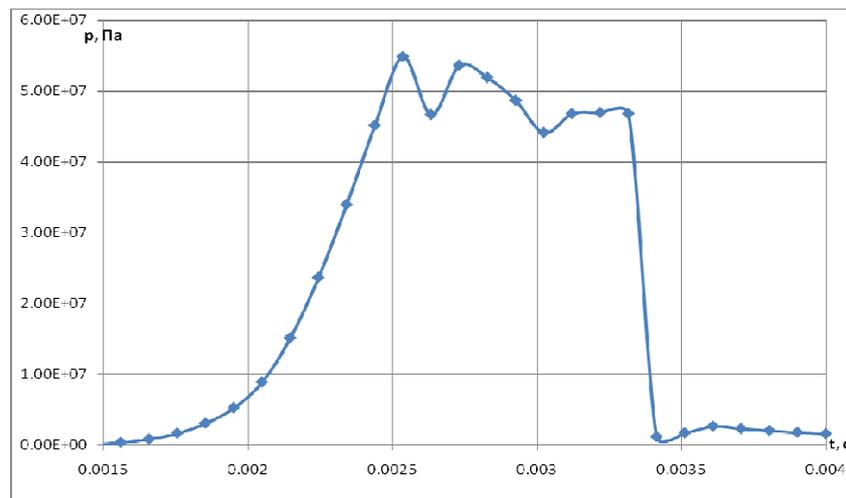


Рис. 9. Индикаторная диаграмма аксиально-плунжерной гидромашины

На графике индикаторной диаграммы видны положительные результаты конструкторской проработки распределительного узла, а именно плавность линии вхождения в зону нагнетания. Таким образом, делаем вывод об успешном проектировании вершины уса.

Отдельного упоминания стоит колебательный процесс в начале зоны нагнетания. Здесь основным дестабилизирующим фактором (кроме сжимаемости жидкости) является процесс самостабилизации гидростатической опоры плунжера. Перемещение плунжера в пределах зазоров между сепаратором, гидростатической опорой и опорным диском приводит к переменному характеру расхода утечек в этой трибопаре и возникновению дополнительных колебаний, приводящих к забросам давления (верхний участок на графике индикаторной диаграммы).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксиально-поршневой регулируемый гидропривод / В.Н. Прокофьев [и др.]; под ред. В.Н. Прокофьева. - М.: Машиностроение, 1969. - 594 с.
2. Даршт, Я.А. Расчетный комплекс машиностроительной гидравлики: монография / Я.А. Даршт. - Ковров: КГТА, 2003. - 412 с.
3. Даршт, Я.А. Комплекс моделирования гидромашин и гидросистем / Я.А. Даршт, А.В. Пузанов, И.Н. Холкин // САПР и графика. - 2003. - № 6. - С. 58-61.
4. SimHydraulics. - Режим доступа: <http://matlab.ru/products/simhydraulics>.
5. Николенко, И.В. Математическое моделирование рабочего процесса в гидроприводе на осно-

Итак, индикаторная диаграмма аксиально-плунжерной гидромашины является наглядной характеристикой динамических качеств изделия. От корректности расчета этой характеристики зависят динамические свойства привода в целом.

В статье предложена методика расчета индикаторной диаграммы АПГМ на микроуровне с использованием программных комплексов *Autodesk Inventor*, *Autodesk Simulation CFD* и *Autodesk Simulation Mechanical*. Представлен пример расчета индикаторной диаграммы с учетом реальных зазоров, самостабилизации гидростатической опоры плунжера и распределительного узла, а также изменения параметров течения рабочей жидкости в зазорах гидромашины при деформации конструктивных элементов, образующих сопряженные поверхности.

ве регулируемых аксиально-поршневых гидромашин / И.В. Николенко, А.Н. Рыжаков // Наука и образование. - 2015. - № 9. - С. 17-31.

6. Пузанов, А.В. Анализ гидромеханики распределительного узла аксиально-плунжерной гидромашины / А.В. Пузанов // Инженерный вестник. - 2016. - № 2. - С. 1-9.
7. Пузанов, А.В. Анализ влияния параметров технологичности изготовления на функционирование элементов ходовой части АПГМ / А.В. Пузанов // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. - 2016. - № 1 (59). - С. 79-84.

8. *Axial-piston Adjustable Hydraulic Drive* / V.N. Prokofiev [et al.]; under the editorship of V.N. Prokofiev. - M.: Mechanical Engineering, 1969. – pp. 594.
9. Darsht, Ya.A. *Rated Complex of Engineering Hydraulics: monograph* / Ya.A. Darsht. - Kovrov: KSTA, 2003. – pp. 412.
10. Darsht, Ya.A. Complex for simulation of hydro-machines and hydro-systems / Ya.A. Darsht, A.V. Puzanov, I.N. Kholkin // CADs and Graphics. - 2003. - № 6. - pp. 58-61.
11. SimHydraulics. – Access mode: <http://matlab.ru/products/simhydraulics>.
12. Nikolenko, I.V. Mathematical modeling of working process in hydraulic drive based on adjustable axial-piston hydro-machines / I.V. Nikolenko, A.N. Ryzhakov // *Science and Education*. - 2015. - № 9. - pp. 17-31.
13. Puzanov, A.V. Analysis of distribution unit hydro-mechanics of axial-plunger hydraulic machine / A.V. Puzanov // *Engineering Bulletin*. - 2016. - № 2. - pp. 1-9.
14. Puzanov, A.V. Impact analysis of manufacturability parameters upon functioning APGM undercarriage elements / A.V. Puzanov // *Bulletin of National Engineering Academy of the Kazakh Republic*. - 2016. - № 1 (59). - pp. 79-84.

*Статья поступила в редколлегию 5.06.17.  
Рецензент: д.т.н., профессор Симаков А.Л.*

#### Сведения об авторах:

**Пузанов Андрей Викторович**, к.т.н., помощник ген. директора по науке ОАО «Специальное конструкторское бюро приборостроения и автоматике», e-mail: [avp@oao-skbpa.ru](mailto:avp@oao-skbpa.ru).

**Puzanov Andrey Victorovich**, Can. Eng., Assistant of the Director-General for Science of PC “Special Design Office of Instrument Making and Automation”, e-mail: [avp@oao-skbpa.ru](mailto:avp@oao-skbpa.ru).

**Ершов Евгений Александрович**, инженер-конструктор ОАО «Специальное конструкторское бюро приборостроения и автоматике», e-mail: [mrershovea@mail.ru](mailto:mrershovea@mail.ru).

**Yershov Yevgeny Alexandrovich**, engineer-designer of PC “Special Design Office of Instrument Making and Automation”, e-mail: [mrershovea@mail.ru](mailto:mrershovea@mail.ru).