

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.643

doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-52-59

Гидродинамический анализ трубопроводов тупиковых линий напорных магистралей гидросистем с учетом высокочастотных пульсаций давления*

И.О. Бобарика, С.В. Молокова

Иркутский национальный исследовательский технический университет

A Hydrodynamic Analysis of the Dead-End Lines of Hydraulic System Pressure Mains Taking into Account High-Frequency Pressure Pulsations

I.O. Bobarika, S.V. Molokova

Irkutsk National Research Technical University

Гидродинамический анализ с использованием инструментов численного моделирования широко применяют при проектировании и модернизации гидросистем изделий авиационной техники, а также при выявлении причин потери герметичности, локальных разрушений и т. д. При этом учитывают как работу гидросистемы в различных режимах, так и процесс перехода от одного режима к другому. Однако в научной литературе отсутствуют сведения об учете высокочастотных пульсаций давления, создаваемых гидронасосом в тупиковых линиях гидросистем, и об их вероятном влиянии на трубопроводы и точки крепления к элементам каркаса планера. В рамках проведенного исследования обнаружена возможность возникновения низкочастотного резонанса в трубопроводах тупиковых линий гидросистем. Описана методика постановки и выполнения конечно-объемного моделирования и гидрогазодинамического анализа. Приведены результаты анализа собственных частот колебаний сборной конструкции трубопроводов напорной линии гидросистемы. Доказано, что частота появляющегося низкочастотного резонанса от пульсаций гидрожидкости не соответствует ни одной из собственных частот колебаний элементов конструкции, а значит, является вынужденной. Акцентируется внимание на необходимости дальнейшей оценки степени влияния описанного явления на ресурс точек крепления трубопроводов к элементам каркаса планера.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Ключевые слова: частотный отклик, гидравлические пульсации, низкочастотный резонанс трубопровода, гидронасос, тупиковая линия

Hydrodynamic analysis with the aid of numerical modeling tools is widely used in the design and modernization of hydraulic systems of aircraft, as well as in the analysis of the causes of depressurization, local destruction, and so on. This analysis includes both the operation of the hydraulic system in different modes, and the process of switching from one mode to another. However, in the scientific literature there is no information that would take account of high-frequency pressure pulsations from the hydraulic pump in the dead-end lines of hydraulic systems, and their possible impact on the pipelines and attachment points to the elements of the airframe. In the scope of this research, the possibility of low-frequency resonance in the dead-end lines of hydraulic systems is determined. A technique for setting and performing finite-volume modeling and hydro-gasdynamic analysis is described. The results of the analysis of the eigenfrequencies of oscillations in prefabricated structures of the hydraulic system pressure lines are presented. It is proven that the frequency of the resulting low-frequency resonance of the hydraulic fluid pulsations does not correspond to any of the eigenfrequencies of oscillations of the structural elements, and is, therefore, forced. The need for further assessment of the degree of influence of the described phenomenon on the operational life of the attachment points to the elements of the airframe is highlighted.

Keywords: frequency response, hydraulic ripple, low-frequency resonance of the pipeline, hydraulic pump, dead-end line

Изделия современной авиационной техники, как правило, предусматривают наличие технологических лючков, куда выведены клапаны и штуцера зарядки и промывки бортовых гидросистем для обеспечения технического обслуживания. Зачастую основные трассировки магистральных трубопроводов расположены на некотором (преимущественно значительном) расстоянии от технологических лючков, поэтому протяженность участка тупиковых трубопроводов от магистральных трубопроводов до штуцеров промывки определяется соотношением $L \geq 100d$, где L и d — длина и диаметр тупикового трубопровода, что сравнимо в некоторых случаях с протяженностью магистральных трубопроводов [1, 2].

Нагрузки, воспринимаемые трубопроводами тупиковых линий, аналогичны таковым для любых других трубопроводов. Это внутреннее давление, периодические и пульсационные нагрузки, а также внешнее силовое воздействие при депланациях планера (при эволюциях в полете), передающееся через точки крепления трубопроводов от элементов каркаса планера [3, 4].

Цель работы — анализ возможности влияния высокочастотных пульсаций, создаваемых гидронасосом в магистральных трубопроводах напорной линии гидросистемы, на трубопроводы тупиковых напорных линий гидросистем.

Рассмотрим следующую гипотезу: в трубопроводах тупиковых напорных линий гидросистем пульсации давления, передаваемые от гидронасоса в поток рабочей жидкости (РЖ), способны вызывать обратные (отраженные) импульсы, которые при взаимодействии с прямыми импульсами могут усиливать последние, образуя резонансные пульсации. В результате этого возникают дополнительные нагрузки на трубопроводы и точки их крепления к элементам каркаса планера, снижающие ресурс указанных точек.

Необходимо отметить, что в отличие от традиционного гидравлического анализа, выполняемого при проектировании/модернизации гидросистем, в данном исследовании присутствует переменная во времени характеристика, отражающая физический смысл импульса давления от гидравлического насоса в гидросистему, что значительно усложняет анализ и предъявляет повышенные требования к программному продукту, в котором он выполняется, а также к мощности расчетной станции.

В качестве исходного расхода РЖ в соответствии с тактико-техническими характеристиками плунжерного гидронасоса НП-128А и с учетом коэффициента его усиления по расходу $K_n = 0,3$ [5] принят объемный расход РЖ $Q_p = 218$ л/мин. Неравномерность подачи

Таблица 1

Теплофизические свойства гидравлического масла АМГ-10

Температура, К	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·град)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	Динамическая вязкость, Па·с
293	835,6	1844	0,1192	0,0175476
313	821,8	1943	0,1163	0,0103711
333	808,4	2039	0,1140	0,00685523
353	794,2	2135	0,1111	0,00486825
373	780,2	2232	0,1087	0,00365134

$m = 1,86\%$ [6, 7]. Амплитуда пульсаций $A = 0,01 \dots 0,03 p_n$, где p_n — исходное давление, задаваемое на входе в исследуемый участок.

При задании давления в гидросистеме учтено, что гидронасос находится на некотором удалении от рассматриваемого участка. Так, с учетом возможных потерь давления на отрезке от гидронасоса до исследуемого участка исходное давление p_n принято равным 26 МПа.

Так как для нестационарных задач очень важными являются вязкостные характеристики РЖ и значение коэффициента поглощения упругих колебаний вследствие внутреннего давления РЖ, дополнительно была проведена их оценка. В частности, теплофизические свойства гидравлического масла АМГ-10 (ГОСТ 6794–75) приведены в табл. 1.

Рабочие жидкости вязкостью от сотых долей до 50 сСт (вязкость АМГ-10 при 20 °С равна 21 сСт) имеют близкие к нулю значения ко-

эффициента поглощения упругих колебаний вследствие внутреннего давления РЖ. Таким образом, при расчете гидросистем затуханием столба РЖ можно пренебречь.

Так как в рамках данного исследования были учтены пульсации рабочего давления РЖ в трубопроводах, все анализы проведены в нестационарной постановке (тип анализа transient) [8, 9]. Выполнить подобного рода задачу с помощью аналитической модели не представляется возможным по целому ряду причин [10, 11]. В связи с этим данная задача решена с помощью численного моделирования.

Все гидродинамические анализы проведены с использованием программного продукта FloEFD for Siemens NX 7.5 компании Mentor Graphics на базе конечно-элементной модели сборной конструкции трубопроводов магистральной и тупиковой напорных линий гидросистемы (рис. 1).

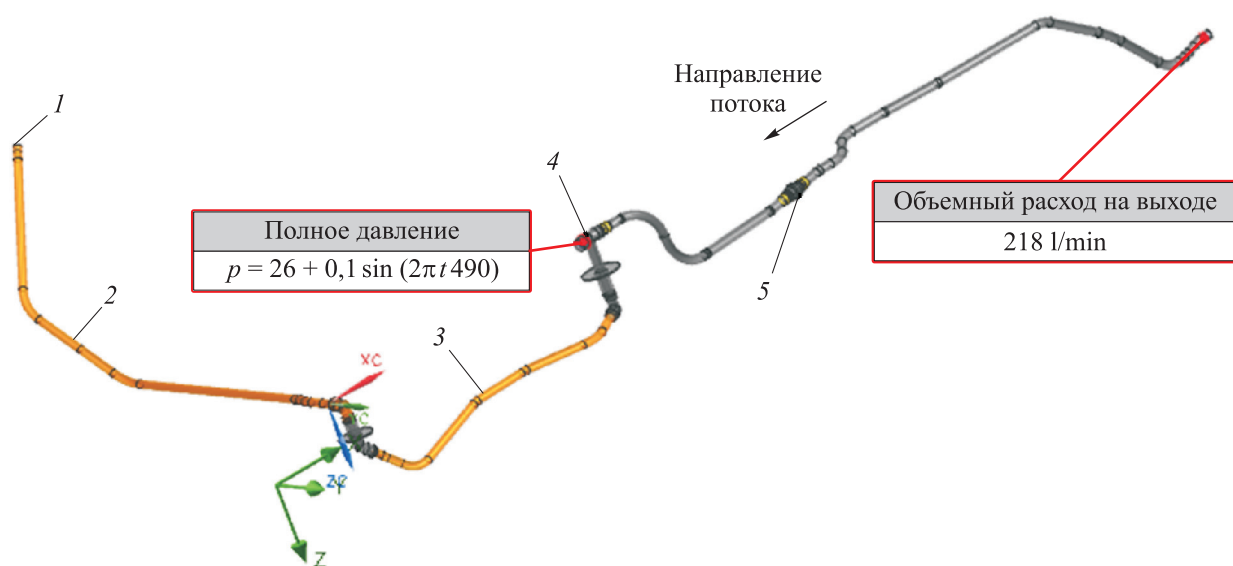


Рис. 1. Конечно-элементная модель сборной конструкции трубопроводов с заданными граничными условиями:

1 — заглушка; 2 — трубопровод № 2; 3 — трубопровод № 1; 4 — фланцевый тройник; 5 — проходник

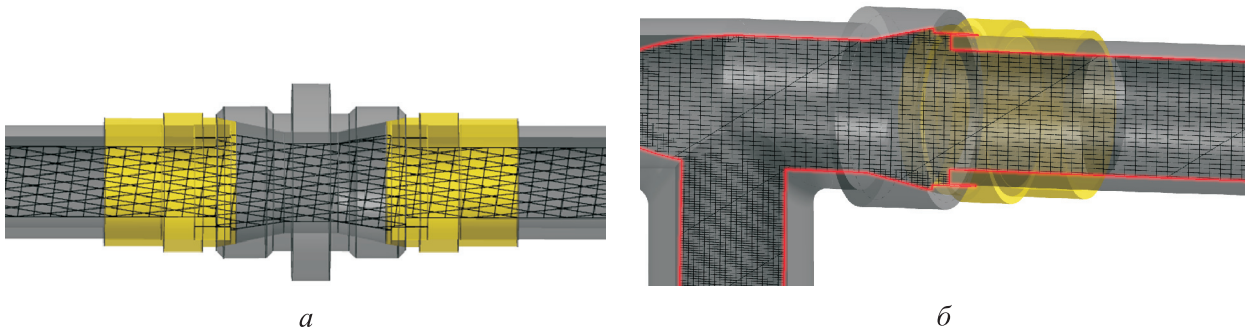


Рис. 2. Общий вид расчетной сетки в проходнике (а) и фланцевом тройнике (б)

Как видно из рис. 1, гидролиния от фланцевого тройника 4 является тупиковой и закрыта заглушкой 1 (на борту летательного аппарата — бортовым клапаном).

Расчетная сетка сформирована на основе начальной сетки с последующим дополнительным многоуровневым разбиением и адап-

тацией в узких каналах [12, 13]. На рис. 2, а и б показан общий вид расчетной сетки в местах соединения трубопроводов: проходнике и фланцевом тройнике.

В качестве граничных условий использовано давление на входе в магистральный трубопровод и объемный расход РЖ на выходе

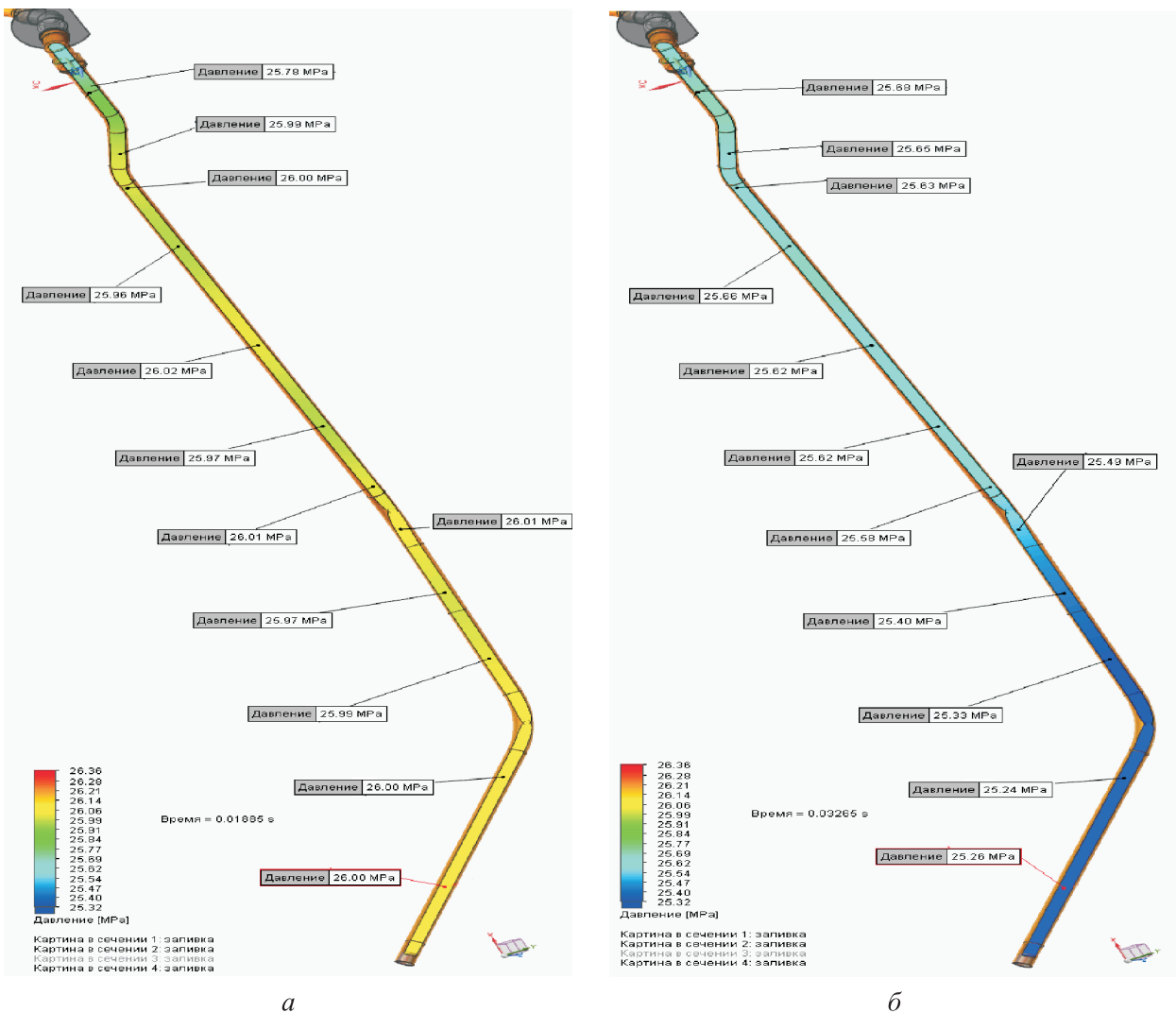


Рис. 3. Распределение давления, МПа, в трубопроводе № 2 в разные моменты времени: а — $t = 0,03265$; б — $t = 0,01885$ с

Таблица 2

Значения собственных частот колебаний сборной конструкции трубопроводов рассматриваемого участка гидросистемы

Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц
1	259,62	11	428,42	21	562,72	31	706,11	41	812,62
2	271,98	12	435,31	22	588,48	32	711,04	42	841,67
3	318,68	13	452,92	23	605,93	33	722,25	43	872,21
4	324,99	14	463,53	24	611,18	34	724,28	44	903,3
5	335,22	15	465,11	25	614,96	35	749,36	45	907,49
6	354,36	16	470,93	26	621,26	36	753,04	46	912,42
7	372,13	17	503,58	27	630,73	37	783,29	47	933,46
8	385,32	18	524,1	28	676,76	38	789,01	48	939,71
9	394,20	19	534,86	29	680,07	39	793,03	49	967,42
10	419,48	20	560,22	30	689,05	40	805,41	50	974,68

(см. рис. 1). Шероховатость трубопроводов $Ra = 1,25$ мкм [14].

Во входном сечении фланцевого тройника рабочее давление в соответствии с тактико-техническими характеристиками гидронасоса НП-128А ($p = 26$ МПа) и с учетом пульсаций задано в виде зависимости

$$p = 26 + 0,1 \sin(2\pi t 490),$$

где t — время.

Расчет выполнен для периода времени $t = 0 \dots 0,2$ с.

При анализе полученных результатов обнаружено, что в трубопроводах № 1 и № 2 (см. рис. 1) волны импульсов давления накладываются друг на друга, образуя перемещающуюся резонансную волну, амплитуда изменения давления в которой составляет 0,7 МПа, а частота по осредненным оценкам — 3...15 Гц. Причем описанная картина более характерна для трубопровода № 2.

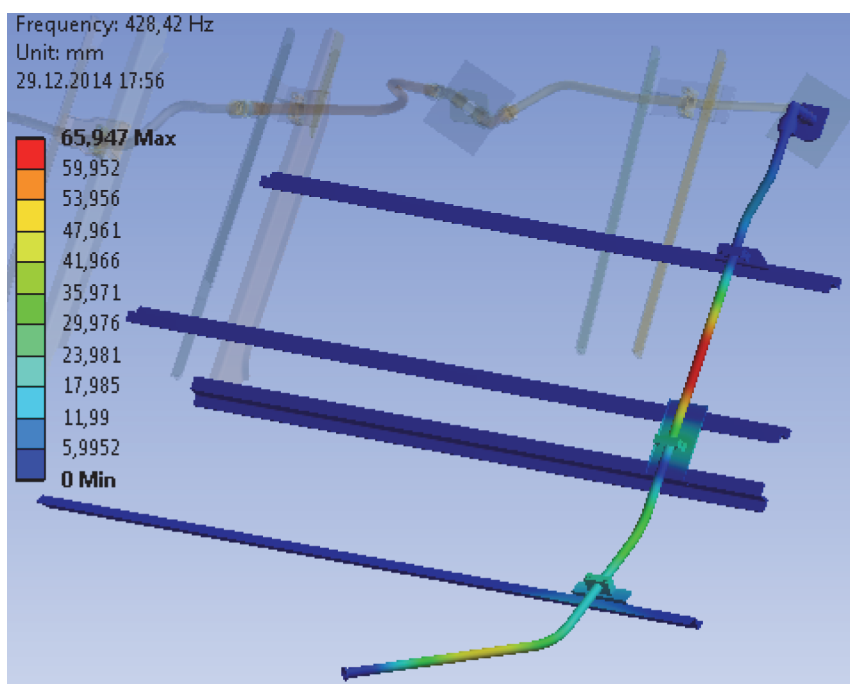


Рис. 4. Картина поведения трубопровода № 2 для частоты 428,42 Гц (мода 11)

Картина распределения давления в трубопроводе тупиковой напорной линии гидросистемы (трубопроводе № 2) в разные моменты времени приведена на рис. 3.

В результате анализа выявлены картины распределения давления на исследуемых участках в заданном диапазоне времени. Помимо импульсов, поступающих от гидронасоса с частотой 490 Гц и амплитудой 0,1 МПа, получена резонансная волна с амплитудой 0,7 МПа и частотой 3...15 Гц по осредненным оценкам. Также отмечено, что при смене режима работы в рассматриваемой тупиковой линии амплитуда колебаний может изменяться в несколько раз.

Картины распределения давления позволяют более качественно определить динамическое нагружение трубопровода, которое невозможно выполнить с помощью программных средств и систем структурного анализа. Однако именно результаты нестационарного гидродинамического анализа с учетом пульсаций позволяют выявить возникающие гидравлические нагрузки в трубопроводах тупиковых линий, что является одной из причин повышенных нагрузок на точки крепления и приводит к снижению их ресурса.

Для проверки гипотезы о влиянии пульсаций РЖ на частотный отклик трубопровода выполнено тензометрирование исследуемого участка гидросистемы.

Также средствами программного комплекса ANSYS определены значения собственных час-

тот колебаний сборной конструкции трубопроводов рассматриваемого участка гидросистемы. Результаты приведены в табл. 2, где жирным шрифтом отмечены собственные частоты колебаний трубопровода № 2.

Картина поведения трубопровода № 2 для частоты 428,42 Гц (мода 11) приведена на рис. 4.

Анализ данных тензометрирования показал, что до частоты 10 Гц наблюдается увеличение вибраций. Это может свидетельствовать о том, что определенные зоны трубопровода способны работать в резонансном режиме, так как полученный диапазон частот входит в таковой для резонансных волн в трубопроводе, но при этом не совпадает ни с одной из мод собственных колебаний.

Выводы

1. Установлено влияние высокочастотных пульсаций давления, создаваемых гидронасосом в магистральных трубопроводах напорной линии гидросистемы, на трубопроводы тупиковых напорных линий гидросистем, в частности, формирование низкочастотных откликов сборной конструкции трубопроводов магистральной и тупиковой напорной линии гидросистемы.

2. Анализ степени влияния описанного явления на ресурс точек крепления трубопроводов к элементам каркаса планера требует дополнительных исследований.

Литература

- [1] Башта Т.М. *Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств*. Москва, Оборонгиз, 1961. 475 с.
- [2] Комаров А.А., Сапожников В.М. *Трубопроводы и соединения для гидросистем*. Москва, Машиностроение, 1967. 232 с.
- [3] Сапожников В.М., Галосюк Г.С. *Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолетов и вертолетов*. Москва, Машиностроение, 1973. 248 с.
- [4] Комаров А.А. *О поперечных колебаниях трубопроводов. Вопросы надежности гидравлических систем*. Киев, Книга, 1961. 272 с.
- [5] Ветров Е.В. *О влияния одной нелинейности на моделирование работы гидронасоса регулируемой производительности*. URL: http://www.rusnauka.com/ONG_2006/Tecnic/17438.doc.htm (дата обращения 20 декабря 2018).
- [6] Астахов А.В., Пономаренко Ю.Ф. *Гидропривод горных машин*. Москва, Недра, 1971. 246 с.
- [7] Пилипенко В.В., ред. *Динамика насосных систем. Сборник научных трудов*. Киев, Наукова думка, 1980. 173 с.
- [8] Фокс Д.А. *Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах*. Москва, Энергоиздат, 1981. 248 с.

- [9] Bobarika I.O., Demidov A.I., Bukharchenko S.E. Hydraulic Model and Algorithm for Branched Hydraulic Systems Parameters Optimization. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1522–1527, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.672
- [10] Попов А.Ю. Имитационное моделирование объемного гидропривода. *Тракторы и сельхозмашины*, 2018, № 3, с. 45–53.
- [11] Ковалев М.А., Бородин Г.В., Хабло И.И. Метод построения диагностической модели гидравлических систем летательных аппаратов в аналитическом виде. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*, 2011, № 6(30), с. 107–113.
- [12] Селезнев В.Е., Прялов С.Н. *Методы построения моделей течений в магистральных трубопроводах и каналах*. Москва, Едиториал УРСС, 2012. 560 с.
- [13] Бобарика И.О., Демидов А.И. Элементы проектирования разветвленных гидросистем с учетом динамики рабочих органов. *Авиационное машиностроение и транспорт Сибири. Сб. ст. VII Всеросс. науч.-практ. конф.*, Иркутск, 13–16 апреля 2016, Иркутск, ИРНИТУ, 2016, с. 237–240.
- [14] Бобарика И.О., Кулагин Р.В., Стегайло О.Д., Столерман А.И., Гусев И.Н., Демидов А.И. Комплексный инженерный анализ сборной конструкции трубопроводов гидросистемы современного высокоманевренного самолета. *Вестник ИргТУ*, 2016, № 6(113), с. 41–49, doi: 10.21285/1814-3520-2016-6-41-49

References

- [1] Bashta T.M. *Raschety i konstruksii samoletnykh gidravlicheskiykh ustroystv* [Calculations and designs of aircraft hydraulic devices]. Moscow, Oborongiz publ., 1961. 475 p.
- [2] Komarov A.A., Sapozhnikov V.M. *Truboprovody i soedineniya dlya gidrosistem* [Pipelines and connections for hydraulic systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1967. 232 p.
- [3] Sapozhnikov V.M., Galosyuk G.S. *Prochnost' i ispytaniya truboprovodov gidrosistem samoletov i vertoletov* [Strength and testing of pipelines of hydraulic systems of aircraft and helicopters]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1973. 248 p.
- [4] Komarov A.A. *O poperechnykh kolebaniyakh truboprovodov. Voprosy nadezhnosti gidravlicheskiykh sistem* [On transverse vibrations of pipelines. Questions of reliability of hydraulic systems]. Kiev, Kniga publ., 1961. 272 p.
- [5] Vetrov E.V. *O vliyaniya odnoy nelineynosti na modelirovanie raboty gidronasosa reguliruemoy proizvoditel'nosti* [About the effects of one of the non-linearity in the modeling of the hydraulic pump controlled performance]. Available at: http://www.rusnauka.com/ONG_2006/Tecnic/17438.doc.htm (accessed 20 December 2018).
- [6] Astakhov A.V., Ponomarenko Yu.F. *Gidroprivod gornyykh mashin* [Hydraulic drive of mining machines]. Moscow, Nedra publ., 1971. 246 p.
- [7] *Dinamika nasosnykh sistem: Sbornik nauchnykh trudov* [Dynamics of pumping systems. Collection of proceedings]. Ed. Pilipenko V.V. Kiev, Naukova dumka publ., 1980. 173 p.
- [8] Foks D.A. *Gidravlicheskiy analiz neustanovivshegosya techeniya v truboprovodakh* [Hydraulic analysis of unsteady flow in pipelines]. Moscow, Ehnergoizdat publ., 1981. 248 p.
- [9] Bobarika I.O., Demidov A.I., Bukharchenko S.E. Hydraulic Model and Algorithm for Branched Hydraulic Systems Parameters Optimization. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1522–1527, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.672
- [10] Popov A.Yu. Simulation modeling of the volumetric hydraulic drive. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2018, no. 3, pp. 45–53.
- [11] Kovalev M.A., Borodkin G.V., Khablo I.I. Method of constructing diagnostic models of aircraft hydraulic systems in an analytic form. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2011, no. 6(30), pp. 107–113 (in Russ.).
- [12] Seleznev V.E., Pryalov S.N. *Metody postroeniya modeley techeniy v magistral'nykh truboprovodakh i kanalakh* [Methods of constructing models of flows in main pipelines and channels]. Moscow, Editorial URSS publ., 2012. 560 p.
- [13] Bobarika I.O., Demidov A.I. Design elements of branched hydraulic systems taking into account the dynamics of the working bodies. *Sbornik statey 7 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Aviamashinostroenie i transport Sibiri* [Collection of articles

VII all-Russian scientific and practical conference aircraft engineering and transport of Siberia]. Irkutsk, 13–16 April 2016, IRNITU publ., 2016, pp. 237–240.

- [14] Bobarika I.O., Kulagin R.V., Stegaylo O.D., Stolerman A.I., Gusev I.N., Demidov A.I. Integrated engineering analysis of the prefabricated pipeline structure of modern highly maneuverable aircrafts. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2016, no. 6(113), pp. 41–49 (in Russ.), doi: 10.21285/1814-3520-2016-6-41-49

Статья поступила в редакцию 11.03.2019

Информация об авторах

БОБАРИКА Игорь Олегович — кандидат технических наук, зам. директора по науке Института авиамашиностроения и транспорта, доцент кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники». ИРНТУ (664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: Bobarika_io@ex.istu.edu).

МОЛОКОВА Светлана Васильевна — кандидат технических наук, зам. директора по учебной работе Института авиамашиностроения и транспорта, доцент кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники». ИРНТУ (664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: molokova_sv@ex.istu.edu).

Information about the authors

BOBARIKA Igor Olegovich — Candidate of Science (Eng.), Deputy Director for Science, Institute of Aircraft Engineering and Transport, Associate Professor, Department of Aircraft Engineering and Operation of Aircraft. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St, Bldg. 83, e-mail: Bobarika_io@ex.istu.edu).

MOLOKOVA Svetlana Vasilievna — Candidate of Science (Eng.), Deputy Director for Academic Affairs, Institute of Aircraft Engineering and Transport, Associate Professor, Department of Aircraft Engineering and Operation of Aircraft. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St, Bldg. 83, e-mail: molokova_sv@ex.istu.edu).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бобарика И.О., Молокова С.В. Гидродинамический анализ трубопроводов тупиковых линий напорных магистралей гидросистем с учетом высокочастотных пульсаций давления. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 52–59, doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-52-59

Please cite this article in English as:

Bobarika I.O., Molokova S.V. A Hydrodynamic Analysis of the Dead-End Lines of Hydraulic System Pressure Mains Taking into Account High-Frequency Pressure Pulsations. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 4, pp. 52–59, doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-52-59