

УДК 629.7.064

doi: 10.18698/0536-1044-2019-5-58-66

Уравнения связи физических и геометрических параметров произвольной разветвленной гидросистемы в общем виде

А.И. Демидов, И.О. Бобарика, И.Н. Гусев

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Constraint Equations of Physical and Geometrical Parameters of an Arbitrary Branched Hydraulic System of the General Form

A.I. Demidov, I.O. Bobarika, I.N. Gusev

Irkutsk National Research Technical University

Тенденции развития авиационной техники предъявляют все более жесткие требования к качеству проектирования воздушного судна как в целом, так и его бортовых силовых систем. Рассмотрена произвольная разветвленная гидравлическая система самолета. При известных выходных характеристиках (т. е. при известном назначении) гидросистемы определены ее внутренние параметры, обеспечивающие эффективное потокораспределение, необходимое для расчетной работы механизмов. Аналитическим методом решена задача получения в общем виде системы уравнений, связывающей физические параметры гидросистемы (мощность источника питания, давление в потребителях, расходы рабочей жидкости во всех функциональных подсистемах) с геометрическими параметрами трубопроводов и потребителей системы. Выведенные уравнения рассмотрены в пространстве физических параметров, а геометрические параметры элементов не заданы в явном виде, что позволило найти единственное однозначное решение для произвольного количества трубопроводов и потребителей, исключая итерационный процесс. Кроме того, конечные уравнения четко определяют наиболее эффективный режим работы источника питания.

Ключевые слова: произвольная разветвленная гидросистема, давление в гидроцилиндре, расход рабочей жидкости, источник питания, эффективное потокораспределение, система уравнений

The development trends of aviation technology impose stringent requirements for the quality of aircraft design in general and its onboard power systems in particular. The article considers an arbitrary branched hydraulic system of the aircraft. With known output characteristics of the hydraulic system, i.e. the function that it must perform, the internal parameters of the system that provide efficient flow distribution required for the calculated operation of the mechanisms are determined. The problem of obtaining a system of equations of the general form linking the physical parameters of the hydraulic system, such as supply power, pressure in consumers and flow rate in all functional subsystems, with the geometric parameters of the pipelines and consumers of the system is solved by an analytical method. The equations in the resulting system are considered in the space of physical parameters. As the geometric parameters of the elements are not specified in an explicit form, it allows the authors to obtain the only unique solution for an arbitrary number of pipelines and consumers, excluding an iterative process. Besides,

the final equations clearly determine the most effective mode of operation of the power supply.

Keywords: branched hydraulic system, hydraulic cylinder pressure, flow rate, power source, efficient flow distribution, system of equations

Тенденции развития авиационной техники предъявляют все более жесткие требования к качеству проектирования воздушного судна как в целом, так и его бортовых силовых систем [1–3]. Гидросистемы современных самолетов — сложные системы, состоящие из множества взаимодействующих элементов [4–6]. Согласование параметров всех элементов для эффективной работы представляет собой весьма сложную задачу [7, 8].

В статье приведены промежуточные результаты разработки методики выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных гидросистем.

Цель работы — определение таких внутренних параметров гидросистемы, которые позволят получить эффективное потокораспределение, обеспечивающее расчетную работу механизмов, при известных выходных характеристиках (т. е. при известном функциональном назначении) гидросистемы.

Расчетная работа механизмов — состояние гидросистемы, при котором производительность насоса обеспечит выход штока за расчетное время всех гидроцилиндров, а размеры трубопроводов — такие потери давления, чтобы сочетание давления в гидроцилиндре и его размеров привело к расчетному усилию F в каждом гидроцилиндре системы.

Для достижения поставленной цели необходимо использовать итерационный процесс уточнения параметров гидросистемы: требуемый размер гидроцилиндра d_c определяется давлением в гидроцилиндре, которое зависит от потерь давления, а значит, и от диаметра трубопроводов d_p и потребного расхода рабочей жидкости (РЖ), зависящего от размеров гидроцилиндра d_c , т. е. $d_c = f(d_p, d_c)$.

При рассмотрении произвольной разветвленной гидросистемы существует произвольное количество как потребителей, имеющих неодинаковые выходные характеристики, так и трубопроводов, питающих одновременно различных потребителей. Поэтому найти параметры такой системы намного сложнее, а применить итерационный процесс одновременно для всех трубопроводов и потребителей невозможно.

Однако все характеристики необходимо увязать для получения потокораспределения, обеспечивающего расчетную работу механизмов. В таких случаях можно использовать сложную модель, представляющую собой систему нелинейных уравнений, которую можно решить только путем проведения дополнительных итерационных и оптимизационных расчетов [9, 10].

Отсюда следует, что решаемая задача заключается в получении уравнения или системы уравнений, однозначно определяющих эффективное потокораспределение.

Вывод уравнения. Получение системы уравнений. Исходя из физического смысла проектирования гидросистемы, в качестве исходных данных примем следующее прямое назначение гидропривода в механизме: в определенный момент совершить поступательное движение с нужными усилием и скоростью посредством гидроцилиндра или вращательное движение с требуемыми моментом и угловой скоростью с помощью гидромотора и т. д.

Известна кинематическая система приводимого механизма, а значит, и необходимые перемещения штоков гидроцилиндров. Система определена в пространстве, т. е. известны расстояния от источника питания до приводимых механизмов и места разветвления трубопроводов.

Известные исходные данные:

- потребные усилия F на штоках гидроцилиндров исполнительных механизмов;
- время t , в течение которого необходим полный выход штока;
- ход штока L_c , поскольку кинематика механизма известна;
- длина всех трубопроводов L_p и точки разветвления, так как система определена в пространстве;
- плотность ρ и вязкость ν РЖ.

Неизвестные параметры (внутренние параметры):

- внутренние диаметры трубопроводов d_p ;
- внутренние диаметры исполнительных полостей гидроцилиндров d_c ;
- производительность источника питания Q ;
- давление источника питания p ;

• скорость РЖ v , усредненная по сечению трубопровода.

Рассмотрим произвольную разветвленную гидросистему, а именно ее напорную линию [11] при установившемся течении во время одновременного срабатывания всех потребителей. Указанная гидросистема изображена с помощью графа на рисунке [12].

Гидросистема имеет шесть контуров, номера которых совпадают с номерами узлов-потребителей j . Узлы 1...6 соответствуют потребителям (гидроцилиндрам), узел 0 — источнику питания. Узлы и ветви пронумерованы так, чтобы номер узла в конце ветви совпадал с номером ветви. Такой подход позволяет использовать одну и ту же букву для обозначения ветвей и узлов i , что существенно упрощает запись, т. е. p_i — давление в узле в конце ветви i и Q_i — расход РЖ через ветвь i .

Уравнение Бернулли с учетом вязкости РЖ для одной ветви запишем в следующем виде:

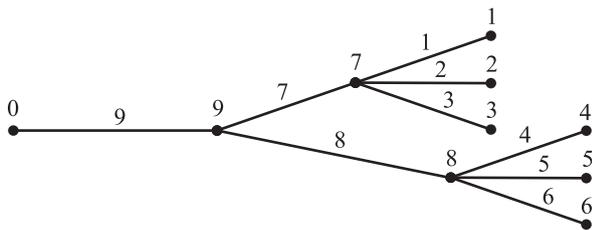
$$\frac{\rho v_{i'}^2}{2} + \rho g h_{i'} + p_{i'} = \frac{\rho v_i^2}{2} + \rho g h_i + p_i + \Delta p_i, \quad (1)$$

где $v_{i'}$ и v_i — скорости РЖ в ветвях i' и i (i' — номер узла в начале ветви i , совпадающий с номером предыдущей ветви); g — ускорение свободного падения; $h_{i'}$ и h_i — высоты ветвей i' и i ; $p_{i'}$ — давление в начале ветви i или в конце предыдущей i' ; Δp_i — потери давления в ветви i .

Вклад слагаемого в выражении (1), учитывающего перепад высоты, в рамках рассмотрения гидросистемы самолета незначителен, так как рабочее давление в ней, как правило, на несколько порядков превышает возможный прирост давления от разницы высоты [13].

Ветвь — участок сети, состоящий из одного или нескольких трубопроводов постоянного диаметра, включая арматуру и другие местные сопротивления. Из закона неразрывности потока следует, что скорость РЖ в пределах одной ветви постоянна. С учетом изложенного

$$p_{i'} = p_i + \Delta p_i. \quad (2)$$



Граф произвольной разветвленной гидросистемы

Рассмотрим уравнение (2) для любой конечной ветви любого контура. Для такой ветви характерно, что давление в конечном узле p_i соответствует потребному давлению для работы гидроцилиндра [14]. Тогда

$$p_i = \frac{F_j}{A_j}, \quad (3)$$

где F_j — потребное усилие потребителя (гидроцилиндра) j ; A_j — рабочая площадь поршня гидроцилиндра j .

Выразим площадь поршня гидроцилиндра j через объем W_j и известную длину хода или длину наполняемой полости гидроцилиндра: $A_j = W_j/L_c$. Расход РЖ в линии питания гидроцилиндра определяется как $Q_i = W_j/t$, откуда $W_j = Q_i t$. Подставив эту формулу в выражение для площади, получим $A_j = Q_i t/L_c$. Отношение длины хода поршня ко времени его перемещения, есть скорость поршня гидроцилиндра v_c , а, следовательно, $A_j = Q_i/v_c$.

После подстановки выражения для площади в формулу (3) имеем

$$p_i = \frac{F_j v_{cj}}{Q_i}. \quad (4)$$

Потери давления на вязкое трение для любой ветви определим по формуле Дарси-Вейсбаха [15]

$$\Delta p_i = \lambda_i \frac{L_{pi}}{d_{pi}} \frac{\rho v_i^2}{2}, \quad (5)$$

где λ_i — коэффициент потерь на трение; L_{pi} — длина трубопроводов ветви i , включая эквивалентную длину местных сопротивлений; d_{pi} — диаметр трубопровода ветви i ; v_i — скорость РЖ в ветви i .

Для ламинарного режима течения $\lambda_i = 64/Re$, число Рейнольдса $Re = 4Q_i/d_{pi} \rho v$. Подставив эти выражения в формулу (5), получим

$$\Delta p_i = \frac{64 d_{pi} \rho v L_{pi}}{4 Q_i d_{pi}} \frac{\rho v_i^2}{2} = \frac{8 \rho v L_{pi} \rho v_i^2}{Q_i}. \quad (6)$$

В данной работе рассмотрено решение задачи в общем виде для произвольной гидросистемы, потребителями которой могут быть не только гидроцилиндры, но и, например, гидромоторы. Режим течения РЖ — турбулентный. Поэтому введем параметры C и B , определяющие тип потребителя и режим течения соответственно.

Для гидроцилиндра

$$C_j = F_j v_c. \quad (7)$$

Для ламинарного режима течения РЖ

$$B_i = 8\pi \nu r v_i^2. \quad (8)$$

Подставив параметры (7) и (8) в выражения (4) и (6), получим

$$p_i = \frac{C_j}{Q_i}; \quad (9)$$

$$\Delta p_i = \frac{B_i L_{pi}}{Q_i}. \quad (10)$$

После подстановки соотношений (9) и (10) в уравнение (2) имеем

$$p_i' = \frac{C_j}{Q_i} + \frac{B_i L_{pi}}{Q_i}. \quad (11)$$

Отсюда

$$Q_i = \frac{C_j + B_i L_{pi}}{p_i'}. \quad (12)$$

Уравнения (11) и (12) справедливы для ветвей 1...6 гидросистемы, граф которой изображен на рисунке. При этом общий узел i' для ветвей 1...3 — узел 7, а для ветвей 4...6 — узел 8.

Рассмотрим ветви выбранной системы, двигаясь от потребителей в сторону источника питания. Ветви 7 и 8 являются общими для нескольких контуров, и уравнения для их физических параметров будут типовыми. Исследуем уравнения общей ветви на примере ветви 7.

Запишем уравнение (2) для ветви 7:

$$p_9 = p_7 + \Delta p_7. \quad (13)$$

Второе слагаемое в уравнении (13) уже определено в выражении (10), а первое слагаемое — в формуле (11). Однако последняя в общем случае является системой с количеством уравнений, равным количеству ветвей, для которых узел i' — общий. Чтобы получить единственное выражение для давления в конечном узле ветви, применим уравнение материального баланса. Для ветви 7 уравнение материального баланса имеет вид

$$Q_7 = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (14)$$

Подставим уже полученное выражение расхода РЖ (12) в уравнение (14) с учетом того, что для ветвей 1...3 узел $i' = 7$ общий:

$$Q_7 = \frac{(C_1 + B_1 L_{p1}) + (C_2 + B_2 L_{p2}) + (C_3 + B_3 L_{p3})}{p_7} = \frac{\sum_{j=1}^3 C_j + \sum_{i=1}^3 B_i L_{pi}}{p_7}. \quad (15)$$

Выразим из уравнения (15) искомое давление:

$$p_7 = \frac{\sum_{j=1}^3 C_j + \sum_{i=1}^3 B_i L_{pi}}{Q_7}. \quad (16)$$

Подставив выражения (16) и (10) в уравнение (13), получим

$$p_9 = \frac{\sum_{j=1}^3 C_j + \sum_{i=1}^3 B_i L_{pi}}{Q_7} + \frac{B_7 L_{p7}}{Q_7}. \quad (17)$$

Следующая ветвь выбранной системы (см. рисунок) при движении от потребителей в сторону источника питания — ветвь 9. Эта ветвь также является общей для нескольких контуров, поэтому уравнение для ее описания будет схожим с выражениями для ветвей 7 и 8.

Запишем уравнение материального баланса для ветви 9, применив выражение (17) для ветвей 7 и 8:

$$Q_9 = \frac{\sum_{j=1}^6 C_j + \sum_{i=1}^6 B_i L_{pi} + B_7 L_{p7} + B_8 L_{p8}}{p_9}. \quad (18)$$

Выразив давление p_9 из уравнения (18) и используя формулу (10), запишем уравнение (2) для ветви 9:

$$p_0 = \frac{\sum_{j=1}^6 C_j + \sum_{i=1}^6 B_i L_{pi} + B_7 L_{p7} + B_8 L_{p8}}{Q_9} + \frac{B_9 L_{p9}}{Q_9}.$$

После преобразований это уравнение приобретает вид

$$p_0 = \frac{\sum_{j=1}^6 C_j + \sum_{i=1}^9 B_i L_{pi}}{Q_9}. \quad (19)$$

Первое слагаемое в числителе уравнения (19) является суммой параметра C всех потребителей, а второе слагаемое — суммой произве-

дений параметра B и длины трубопровода для каждой ветви. Также отметим, что расход РЖ в ветви 9 рассмотренной системы равен потребной производительности насоса.

Окончательное уравнение связи физических и геометрических параметров гидросистемы в общем виде для любой ветви имеет вид

$$Q_i = \frac{\sum_{j \in n_j} C_j + \sum_{i \in m_i} B_i L_{pi}}{p_i}, \quad (20)$$

где n_j — множество номеров контуров, которым принадлежит ветвь i ; m_i — множество номеров ветвей, в которых РЖ проходит через ветвь i .

Количество потребителей в гидросистеме обозначим как n , а количество ветвей — m . Для любой произвольной гидросистемы существует m уравнений (20), образующих систему, где неизвестными являются Q_i и p_i для всех ветвей. Тогда количество неизвестных в системе уравнений (20) равно $2m$.

Введем уравнения, определяющие давление p_i в конечном узле ветви i на основании выражений (2) и (10). Однако такое уравнение невозможно получить для p_i ветвей с начальным узлом в источнике питания. Поэтому построим систему из $2m - k$ уравнений для $2m$ неизвестных, где k — количество ветвей с начальным узлом в источнике питания:

$$Q_i = \frac{\sum_{j \in n_j} C_j + \sum_{i \in m_i} B_i L_{pi}}{p_i} \quad (21)$$

при $i = 1 \dots m$ и $j = 1 \dots n$.

Решить проблему разницы количества уравнений и неизвестных можно путем задания граничных условий на входе в систему. Достаточно задать производительность Q_0 или номинальное давление p_0 источника питания, чтобы сделать систему разрешимой. Таким образом, получена система из $2m - k$ уравнений для $2m - k$ неизвестных.

В результате решения задачи проектирования гидросистемы необходимо выявить искомые неизвестные параметры — внутренние диаметры трубопроводов d_p и исполнительных полостей потребителей d_c .

Приведем искомые геометрические параметры к определяющим их физическим параметрам гидросистемы.

Для обеспечения единственности решения и равномерного потокораспределения примем скорость РЖ во всей гидросистеме неизменной ($v = \text{const}$). Таким образом, расходы РЖ Q_i , найденные в результате решения системы уравнений (21), однозначно определяют диаметры трубопроводов каждой ветви:

$$d_{pi} = \sqrt{\frac{4Q_i}{v\pi}}.$$

Давления p_i в соответствующих потребителям узлах обозначим как p_j . С учетом известного потребного усилия F_j давления p_j однозначно определяют диаметры исполнительных полостей потребителей:

$$d_{cj} = \sqrt{\frac{4p_j}{F_j\pi}}. \quad (22)$$

Если в гидросистеме применены не гидроцилиндры, а другие потребители, выражение (22) изменится. Полученных данных при решении системы (21) достаточно для нахождения характерных размеров потребителей любого типа.

Обсуждение результатов. Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности получения проектного решения с указанием мощности насосов, диаметров трубопроводов и исполнительных полостей гидроцилиндров на основе требуемых выходных характеристик гидросистемы.

Следует отметить частный случай уравнения (20) для ветви, берущей начало непосредственно в источнике питания. Он интересен тем, что расход Q_i и давление p_i для такой ветви являются производительностью насоса и его номинальным давлением соответственно.

Тогда уравнение (20) преобразуется в уравнение, однозначно определяющее потребную мощность источника питания,

$$N = \sum_{j=1}^n C_j + \sum_{i=1}^m B_i L_{pi}.$$

Существуют широкие возможности для развития полученных результатов.

Величины C_j и B_i , учитывающие тип потребителя и режим течения РЖ, намеренно введены в уравнение как самостоятельные параметры для обеспечения записи в общем случае. В дальнейшем стоит задача определения

параметра B для турбулентного режима течения и параметра C для других типов потребителей, например для гидромоторов.

Система уравнений (21) является математической моделью гидросистемы с эффективным потокораспределением [16]. В данной работе рассмотрено установившееся течение РЖ, но такую модель удобно использовать как базовую и с помощью дифференцирования по времени [17] перейти, например, к учету наличия в гидросистеме регулирующих устройств и изменения характеристик РЖ (нагрева, вязкости и т. д.) в процессе течения.

Выводы

1. Получена система уравнений, позволяющая, задавшись выходными характеристиками гидросистемы (усилиями, скоростями и перемещениями на исполнительных механизмах) и ее пространственным положением, определить ее необходимые и достаточные внутренние параметры, обеспечивающие расчетную работу механизмов.

2. Система уравнений связывает физические и геометрические параметры гидросистемы (мощность источника питания, давления и расходы во всех ветвях) с геометрическими параметрами всех трубопроводов и потребителей системы. Уравнения рассмотрены в пространстве физических параметров, причем геометрические параметры элементов не зада-

ны в явном виде, что позволило определить единственное однозначное решение для произвольного количества элементов (трубопроводов, потребителей), удовлетворяющее поставленной задаче.

3. Важная особенность системы уравнений (21) заключается в том, что при любых исходных данных вычисляются параметры гидросистемы, обеспечивающие эффективное потокораспределение, не требующее дополнительной увязки расходов или давлений по узлам, при котором задействованные потребители функционируют с нужными усилием и скоростью, а наиболее эффективный режим работы источника питания четко определен. При этом исключен итерационный процесс.

4. Представленные данные являются промежуточным результатом разработки методики выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных гидросистем [18]. При введении варьируемых параметров можно реализовать поиск их оптимальных значений по заданному критерию, например по минимальной массе системы [19].

5. Предложенная система уравнений весьма удобна для математического моделирования. В настоящее время активно ведутся работы по реализации созданной математической модели и разрабатываемой методики оптимизации гидросистем в виде программного кода в среде MATLAB.

Литература

- [1] Белевитин Б.В., Фомичев В.М. *Авиационный гидропривод — состояние и перспектива. Датчики и системы*. Москва, Сенсидат-Плюс, 2002, с. 3–5.
- [2] *Авиационные правила АП-25. Нормы летной годности транспортной категории*. Ленинград, ЛИИ им. М.М. Громова, 1994. 321 с.
- [3] Yakhnenko M.S., Bobarika I.O., Demidov A.I. Determining Pipeline Eigenfrequencies on the Basis of the Shock Response of Prefabricated Structures. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 10, pp. 743–747, doi: 10.3103/S1068798X18100179
- [4] Кулагин Р.В., Стегайло О.Д., Столерман А.И., Гусев И.Н., Бобарика И.О., Демидов А.И. Комплексный инженерный анализ сборной конструкции трубопроводов гидросистемы современного высокоманевренного самолета. *Вестник ИргТУ*, 2016, № 6(113), с. 41–50, doi: 10.21285/1814-3520-2016-6-41-49
- [5] Шумилов И.С., Штыков В.А. Гидравлические системы управления механизацией крыла самолета. Опыт их создания. *Инженерный вестник*, 2015, № 1, с. 7–29. URL: engsi.ru/file/out/756354 (дата обращения 15 декабря 2018).
- [6] Левицкий А.В., Севостьянов С.Я. Проект системы автоматизированного управления дистанционным отклонением элерона аэродинамической модели самолета на основе гидравлического силового привода. *Матер. XXVIII научн.-техн. конф. по аэродинамике*, Жуковский, 20–21 апреля 2017, Жуковский, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 2017, с. 164–165.

- [7] Боровин Г.К., Попов Д.Н. Проектирование гидросистем энергопитания приводов промышленных роботов. *Математическое моделирование*, 1996, № 9, с. 43–53.
- [8] Бобарика И.О., Демидов А.И. Совершенствование всасывающих линий гидросистем с учетом кавитации. *Труды МАИ*, 2016, № 85. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/fcc/bobarika_demidov_rus.pdf?lang=en&issue=85 (дата обращения 10 декабря 2018).
- [9] Федоров В.В., Афанасьев С.В. Расчет оптимальных диаметров гидравлической сети с помощью конвективно-диффузионного метода условной минимизации. *Вектор науки ТГУ*, 2017, № 2(40), с. 62–67, doi: 10.18323/2073-5073-2017-2-62-67
- [10] Исаенко С.А., Медведева В.Н., Щербашин Ю.Д. Оптимизация расчета гидравлических сетей с висящими узлами. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2010, т. 2, № 4, с. 20–27.
- [11] Одельский Э.Х. *Гидравлический расчет трубопроводов разного назначения*. Минск, Высшая школа, 1967. 103 с.
- [12] Меренков А.П., Хасилев В.Я. *Теория гидравлических цепей*. Москва, Наука, 1985. 279 с.
- [13] Матвеев А.М., Зверев И.И. *Проектирование гидравлических систем летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1998. 296 с.
- [14] Башта Т.М. *Гидравлика, гидромашины и гидроприводы*. Москва, Машиностроение, 1982. 423 с.
- [15] Альтшуль А.Д. *Гидравлические сопротивления*. Москва, Недра, 1982. 224 с.
- [16] Мышкис А.Д. *Элементы теории математических моделей*. Москва, КомКнига, 2007. 192 с.
- [17] Фокс Д.А. *Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах*. Москва, Энергоиздат, 1981. 248 с.
- [18] Bobarika I., Demidov A., Bukhanchenko S. Hydraulic model and algorithm for branched hydraulic systems. *Procedia Engineering*, 2017, no. 206, pp. 1522–1527, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.672
- [19] Корнеев В.П. *Методы оптимизации*. Москва, Высшая школа, 2007. 664 с.

References

- [1] Belevitin B.V., Fomichev V.M. *Aviatsionnyy gidroprivod — sostoyanie i perspektiva. Datchiki i sistemy* [Aviation hydraulic drive — state and perspective. Sensors and systems]. Moscow, Sensidat-Plyus publ., 2002, pp. 3–5.
- [2] *Aviatsionnye pravila AP-25. Normy letnoy godnosti transportnoy kategorii* [Aviation rules AP-25. Airworthiness standards of the transport category]. Leningrad, LII im. M.M. Gromova publ., 1994. 321 p.
- [3] Yakhnenko M.S., Bobarika I.O., Demidov A.I. Determining Pipeline Eigenfrequencies on the Basis of the Shock Response of Prefabricated Structures. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 10, pp. 743–747, doi: 10.3103/S1068798X18100179
- [4] Kulagin R.V., Stegaylo O.D., Stolerman A.I., Gusev I.N., Bobarika I.O., 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. 41–50 (in Russ.), doi: 10.21285/1814-3520-2016-6-41-49
- [5] Shumilov I.S., Shtykov V.A. Hydraulic control systems for aircraft wing mechanization. The experience of their creation. *Inzhenernyy vestnik*, 2015, no. 1, pp. 7–29 (in Russ.). Available at: engsi.ru/file/out/756354 (accessed 15 December 2018).
- [6] Levitskiy A.V., Sevost'yanov S.Ya. The project of the automated control system for remote deviation of the aileron aerodynamic model of the aircraft based on hydraulic power drive. *Materialy XXVIII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po aehrodinamike Tsentral'noy aehrogidrodinamicheskoy institut im. prof. N.E. Zhukovskogo* [Proceedings of the XXVIII Scientific and Technical Conference on Aerodynamics. Central Aerohydrodynamic Institute. prof. named after N.E. Zhukovsky]. 2017, pp. 164–165.
- [7] Borovin G.K., Popov D.N. Designing hydraulic power supply drives for industrial robots. *Matematicheskoe modelirovanie*, 1996, no. 9, pp. 43–53 (in Russ.).

- [8] Bobarika I.O., Demidov A.I. Improvement suction lines of hydraulic systems taking into account cavitation. *Trudy MAI*, 2016, no. 85 (in Russ.). Available at: http://trudymai.ru/upload/iblock/fcc/bobarika_demidov_rus.pdf?lang=en&tissue=85 (accessed 10 December 2018).
- [9] Fedorov V.V., Afanas'ev S.V. The calculation of optimal diameters of hydraulic network using the convection-diffusion method of constrained minimization. *Vektor nauki TGU*, 2017, no. 2(40), pp. 62–67 (in Russ.), doi: 10.18323/2073-5073-2017-2-62-67
- [10] Isaenko S.A., Medvedeva V.N., Shcherbashin Yu.D. Optimisation of calculation of hydraulic networks with dangling nodes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 20–27 (in Russ.).
- [11] Odel'skiy Eh.Kh. *Gidravlicheskiy raschet truboprovodov raznogo naznacheniya* [Hydraulic calculation of pipelines for different purposes]. Minsk, Vysshaya shkola publ., 1967. 103 p.
- [12] Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskiykh tsepey* [Theory of hydraulic circuits]. Moscow, Nauka publ., 1985. 279 p.
- [13] Matveenko A.M., Zverev I.I. *Proektirovanie gidravlicheskiykh sistem letatel'nykh apparatov* [Design of aircraft hydraulic systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1998. 296 p.
- [14] Bashta T.M. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982. 423 p.
- [15] Al'tshul' A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Hydraulic resistance]. Moscow, Nedra publ., 1982. 224 p.
- [16] Myshkis A.D. *Ehlementy teorii matematicheskikh modeley* [Elements of the theory of mathematical models]. Moscow, KomKniga publ., 2007. 192 p.
- [17] Foks D.A. *Gidravlicheskiy analiz neustanovivshegosya techeniya v truboprovodakh* [Hydraulic analysis of unsteady flow in pipelines]. Moscow, Ehnergoizdat publ., 1981. 248 p.
- [18] Bobarika I., Demidov A., Bukhanchenko S. Hydraulic model and algorithm for branched hydraulic systems. *Procedia Engineering*, 2017, no. 206, pp. 1522–1527, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.672
- [19] Korneenko V.P. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2007. 664 p.

Статья поступила в редакцию 29.03.2019

Информация об авторах

ДЕМИДОВ Андрей Игоревич — аспирант кафедры «Самолетостроение и эксплуатация летательных аппаратов». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: demidov-ai@yandex.ru).

БОБАРИКА Игорь Олегович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение и эксплуатация летательных аппаратов». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: bobarika_io@istu.edu).

ГУСЕВ Игорь Николаевич — кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Самолетостроение и эксплуатация летательных аппаратов». Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: Gusev@istu.edu).

Information about the authors

DEMIDOV Andrey Igorevich — Postgraduate, Department of Aircraft Engineering and Operation of Aircraft. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: demidov-ai@yandex.ru).

BOBARIKA Igor Olegovich — Candidate of Science (Eng.), 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@istu.edu).

GUSEV Igor Nikolayevich — Candidate of Science (Eng.), Head of Department, Aircraft Engineering and Operation of Aircraft. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St., Bldg. 83, e-mail: Gusev@istu.edu).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Демидов А.И., Бобарика И.О., Гусев И.Н. Уравнения связи физических и геометрических параметров произвольной разветвленной гидросистемы в общем виде. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 5, с. 58–66, doi: 10.18698/0536-1044-2019-58-66

Please cite this article in English as:

Demidov A.I., Bobarika I.O., Gusev I.N. Constraint Equations of Physical and Geometrical Parameters of an Arbitrary Branched Hydraulic System of the General Form. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 5, pp. 58–66, doi: 10.18698/0536-1044-2019-58-66



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
П.П. Телепнева, Д.А. Кузнецова

Под редакцией д-ра техн. наук, профессора В.В. Ефанова

**«Основы проектирования транспортных
космических систем»**

Рассмотрены основы проектирования виброзащиты прецизионных космических аппаратов для улучшения разрешающей способности устанавливаемой на борту целевой аппаратуры при влиянии динамических источников возмущений. Представлены методы и средства виброзащиты, а также принципы работы, математические модели и практические примеры создания виброзащитных устройств. Приведен инженерный алгоритм в виде структурной схемы обеспечения виброзащиты космических конструкций для практической реализации.

Для студентов аэрокосмического факультета, обучающихся по специальностям «Проектирование летательных аппаратов и их комплексов», «Космические аппараты и разгонные блоки», также может представлять интерес для специалистов предприятий космической отрасли.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru