

Леонид Самойлович Яновский родился в 1948 г. Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1976 г. Д-р техн. наук, профессор, начальник отдела “Специальные авиационные двигатели и химмотология” ФГУП ЦИАМ – Центрального ин-та авиационного моторостроения им. П.И. Баранова. Автор более 250 научных работ в области тепло- и массообмена при течении термохимически нестабильных жидкостей и газов, проблем создания и применения энергоемких и эндотермических реактивных топлив и термостабильных смазочных авиамасел, а также рабочих процессов в узлах интегральных прямоточных и ракетно-прямоточных воздушно-реактивных двигателей на топливах различного агрегатного состояния.

L.S. Yanovsky (b. 1948) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972 and Lomonosov Moscow State University in 1976. D. Sc. (Eng.), professor, head of department of Federal State Unitary Enterprise TsIAM – Central Institute for Aviation Motor Building n.a. P.I. Baranov. Author of more than 250 publications in the field of heat and mass exchange in flow of thermal-chemically unstable liquids and gases, problems of creation of power consuming and endothermic jet engine fuels and temperature-stable aircraft lubricating oils and also in the field of working processes in units of integral ramjets and rocket-ramjets with fuels of various aggregative states.

УДК 62-82

Д. Н. П о п о в, Д. С. Ч в я л е в

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ОПОРЕ ШТОКА

Приведены краткие сведения о применении гидростатических опор штоков гидроцилиндров. Составлена математическая модель течения жидкости в щели гидростатической опоры. При этом учтена клиновидная форма щели, образующейся вследствие перекоса штока в цапфе гидроопоры под действием внешней радиальной нагрузки. Описаны методика численного исследования течения жидкости в щели для определения интегральных характеристик гидростатической опоры. Результаты расчетов подтверждены физическим экспериментом.

При проектировании гидроприводов, создающих сложные динамические законы нагружения, подверженного испытаниям образца, необходимо уделять особое внимание уплотнительным элементам гидроцилиндра (ГЦ). С одной стороны, для создания больших нагрузок на образце необходимы высокие давления, что обуславливает применение контактных уплотнений, но в зоне контакта уплотнения с неподвижными деталями ГЦ возникают значительные силы сухого трения. С другой стороны, моделирование сложных динамических законов нагружения требует соблюдения точной формы сигнала на выходе гидропривода, что невозможно обеспечить при наличии сил сухого трения в контактных уплотнениях. Кроме того, при достаточно больших

скоростях перемещения поршня ГЦ происходит нагрев уплотнительного элемента в пятне контакта, что существенно ограничивает долговечность уплотнения [1]. Чтобы преодолеть указанные недостатки контактных уплотнений передовые фирмы, такие как Schenck, MTS, Instron и другие, применяют гидростатические опоры (ГО), методы расчета и проектирования которых не приводятся. Поэтому исследование течения вязкой жидкости в щелях ГО в целях расчета характеристик ГО является актуальной задачей.

Исходные предпосылки для проводимого исследования. Расчет гидростатической опоры заключается в определении ее несущей способности, утечек жидкости и условий бесконтактной работы пар трения. Для такого расчета необходимо иметь математическую модель ГО. В известных математических моделях, описывающих работу ГО, обычно не учтен ряд особенностей течения жидкости в щели ГО [2, 3]. В работах [4, 5] приведен расчет с помощью математической модели, основанной на уравнении Рейнольдса, для ламинарного потока газа и жидкости, протекающих в щелях опор. В модели не учитывалась клиновидная форма щели, вызванная действием на шток внешней радиальной силы. Изменение формы щели может быть существенным для несущей способности ГО. Кроме того, приближенно определены границы потоков вблизи соседних карманов ГО. В связи с перечисленными замечаниями возникла необходимость в совершенствовании математических моделей ГО [6].

Гидростатическая опора (рис. 1) представляет собой цапфу 1 с четырьмя противоположно расположенными карманами, к которым под

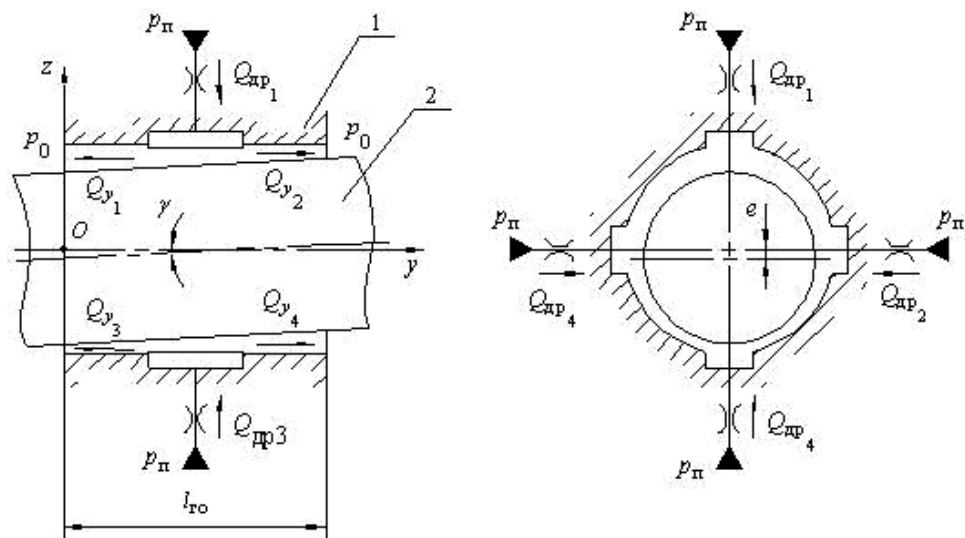


Рис. 1. Схема радиальной гидростатической опоры:

1 — цапфа гидропоры; 2 — шток; $p_п$ — давление питания; p_0 — давление слива; $Q_{дрi}$ — расходы жидкости, поступающей в ГО; Q_{yi} — расходы жидкости, вытекающей из ГО; $l_{го}$ — длина ГО; e — эксцентриситет; y, z — координаты

давлением питания $p_{\text{п}}$ через постоянные дроссели поступают расходы жидкости $Q_{\text{др}_i}$ ($i = 1, 2, 3, 4$).

В цапфе находится шток 2. Под действием внешней радиальной нагрузки шток смещается вдоль оси z на величину эксцентриситета e , что вызывает появление клиновидного зазора (см. рис. 1). Сила, создаваемая перепадом давления в камерах ГО, стремится вернуть шток в исходное положение. Эта сила характеризует несущую способность ГО. Другой характеристикой является расход Q_{y_i} жидкости, протекающей через ГО.

Математическое моделирование течения вязкой жидкости в гидростатической опоре. При составлении математической модели и ее исследовании численными методами использовался программный комплекс STAR-CD, который является одним из основных пакетов так называемого тяжелого класса CFD (Computational Fluid Dynamics). Он предназначен для анализа гидро- и газодинамических процессов в промышленном оборудовании, в транспортных средствах, в окружающей среде и т.п. Комплекс содержит высокопроизводительный решатель для трехмерных уравнений Навье–Стокса. Соответствующие разностные уравнения построены методом конечных объемов. При этом применены различные полностью неявные и смешанные схемы от первого до третьего порядка аппроксимации. Например, такие как схема Крэнка–Николсона по времени, схемы QUICK и MARS по пространству и др. Решения уравнений находятся с помощью известных релаксационных алгоритмов SIMPLE, PISO и SIMPISO.

Основной проблемой при расчете течения жидкости в щелях ГО является достаточно малое отношение величины зазора к его длине. Это приводит к тому, что ячейки сеточной модели получают вытянутыми вдоль одного направления, что приводит к плохой сходимости решения. Однако эффективная параллелизация алгоритма решения в используемом программном комплексе в сочетании с методиками автоматизированного разбиения области течения позволяют моделировать задачи любой степени геометрической сложности, включая капиллярные течения, а также течения в щелях с малыми зазорами. Гарантией качества расчета является широкое использование программы промышленными корпорациями, инжиниринговыми фирмами и научно-исследовательскими центрами, как российскими, так и зарубежными.

Основой математической модели течения вязкой жидкости в щели ГО являются фундаментальные уравнения механики жидкости, которые для краткости можно записать, используя числовую индексацию декартовых координат x_1, x_2, x_3 и проекций V_1, V_2, V_3 вектора скорости жидкости [7]. Соответственно уравнение неразрывности несжимаемой

жидкости представлено в виде

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

а уравнение Навье–Стокса в виде

$$\rho \frac{\partial V_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_j V_i - \sigma_{ij}) = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad (2)$$

где $\sigma_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$ — компонента тензора напряжений для элемента жидкости; $s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$; $i (j, k) = 1, 2, 3$; ρ — плотность жидкости; t — время; p — давление жидкости; F_i — проекции вектора массовых сил; μ — динамическая вязкость; δ_{ij} — функция Кронекера, $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$ и $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$.

Если проекции массовых сил F_i считать предварительно заданными, то остаются неизвестные величины: V_i и p . Чтобы их вычислить, имеется система из четырех дифференциальных уравнений (1) и (2), которая при наличии граничных условий полностью определяет процессы, происходящие в щели ГО. Граничными условиями являются величины давления $p_{\text{п}}$ на входе в подводящие каналы ГО и давления p_0 на выходе ГО (см. рис. 1).

Задачу решали, учитывая симметричность геометрии расчетной области относительно оси Oy . Следовательно, в плоскости сечения расчетной области задавали граничные условия симметрии. Такие граничные условия накладывают ограничения на скорости потока жидкости. Предполагается, что на гранях ячеек, лежащих в плоскости симметрии, составляющие скоростей потока, направленные по нормали к этим граням, равны нулю. Поэтому в плоскости симметрии течение является двумерным.

На все остальные поверхности расчетной области наложены граничные условия, соответствующие условию прилипания жидкости к стенкам, т.е. скорость жидкости на стенках приравнивается к нулю. Течение принято ламинарным при изотермическом режиме.

Решения этих уравнений описывают распределения давления и скоростей по трем направлениям декартовой системы координат для расчетной области течения жидкости в ГО. При решении задачи уравнения в частных производных заменяют разностными выражениями, представленными в виде

$$\sum_j P_j^{n+1} = 0,$$

$$r_\phi^{n+1} = A_M \phi_M^{n+1} - \sum_m A_m \phi_m^{n+1} - f_1,$$

где $P_j = (\rho \vec{V}_r \vec{S})_j$ — массовый поток жидкости через произвольную поверхность \vec{S} j -й ячейки; \vec{V}_r — вектор скорости жидкости относительно поверхности \vec{S} ; ϕ — параметр для любых зависимых переменных (p, V_i); n — номер узла по итерационному времени; $A_M = \sum_m A_m + f_2$, где A_m — член, учитывающий конвективные и диффузионные составляющие; m — количество ячеек; $f_{1,2}$ — коэффициенты силовых составляющих.

Систему этих уравнений решали методом конечных объемов с применением методов установления и расщепления. В результате были получены линии тока (рис. 2, а) и поля давлений (рис. 2, б) для промежуточного положения штока. Поля представлены для среднего сечения по зазору ГО. На рис. 2, а нанесена воображаемая линия взаимодействия потоков жидкости, поступающей из соседних карманов. Как видно из рисунка, в процессе перекоса штока линия взаимодействия потоков жидкости смещается параллельно оси штока.

По рассчитанным полям давления и скоростей жидкости определены интегральные характеристики гидростатической опоры:

— несущая способность ГО

$$\vec{P}_{го} = \sum_m \vec{P}_{го m},$$

где $\vec{P}_{го m} = p_{ш m} \vec{S}_m$ — несущая способность одной ячейки рассматриваемой области; $p_{ш m}$ — давление в ячейке, действующее на поверхность штока \vec{S}_m ; m — количество ячеек, граничащих с поверхностью штока;

— расход жидкости, протекающей через ГО,

$$Q_{го} = \sum_n \left[(Q_{y_n})|_{y=0} + (Q_{y_n})|_{y=l_{го}} \right],$$

где $(Q_{y_n})|_{y=0} = (V_{y_n} S_n)|_{y=0}$ — расход жидкости, протекающей через щель ГО со стороны $y = 0$; $(Q_{y_n})|_{y=l_{го}} = (V_{y_n} S_n)|_{y=l_{го}}$ — расход жидкости, протекающей через щель ГО со стороны $y = l_{го}$, при этом V_{y_n} — проекция на ось Oy скорости жидкости, протекающей через поверхность S_n ячейки на границах щели; n — количество ячеек, через которые протекает жидкость.

Экспериментальное определение интегральных характеристик гидростатической опоры. Для экспериментальной проверки результатов численного исследования был создан стенд, позволяющий проводить испытания ГО при нагружении штока внешней радиальной силой. Нагрузка на шток передавалась через тарированную пружину при ее сжатии с помощью специального винта. Перемещения пружины и штока поршня определялись с помощью индикаторов

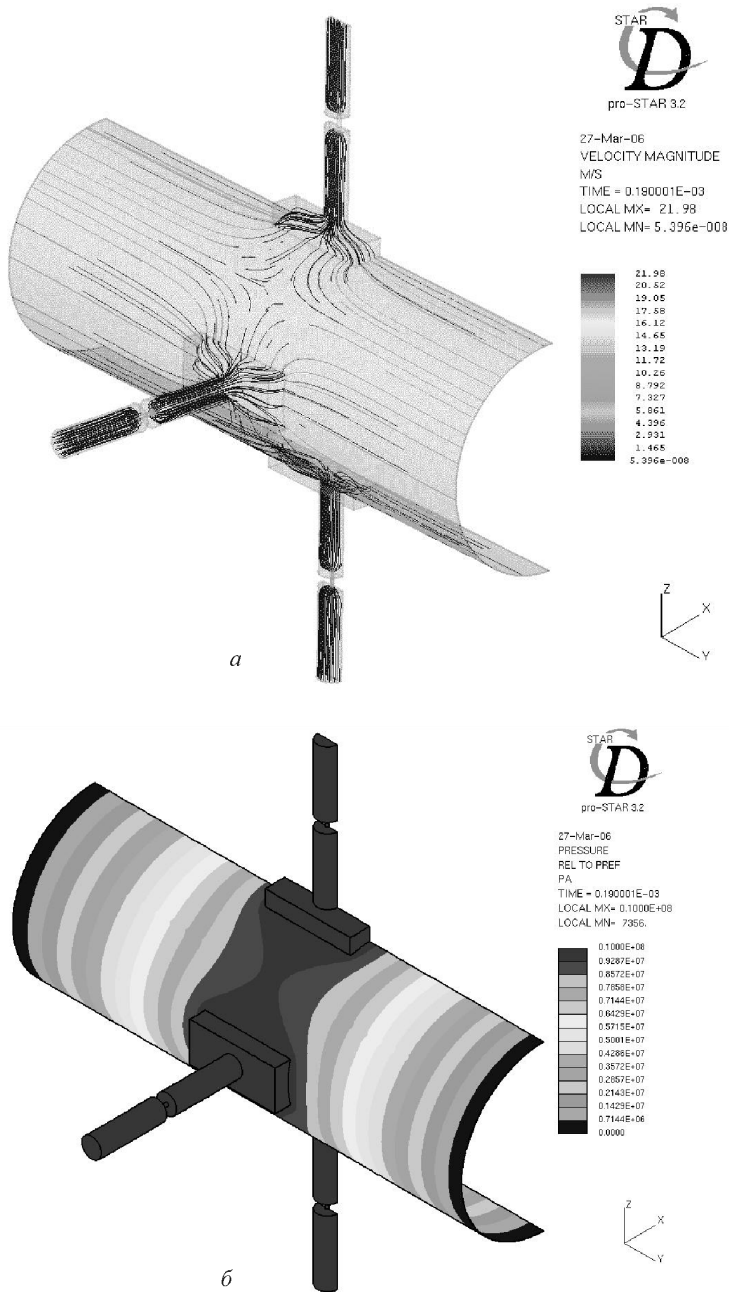


Рис. 2. Линии тока (а) и поля давлений (б) жидкости для промежуточного положения штока

часового типа. Фотография фрагмента экспериментальной установки, предназначенной для таких испытаний, приведена на рис. 3.

В процессе экспериментального исследования были получены характеристики $Q_{го} = Q_{го}(\bar{\gamma})$ и $P_{го} = P_{го}(\bar{\gamma})$, в которых $\bar{\gamma}$ – безразмерный угол перекоса штока от внешней радиальной силы, равный отношению текущего угла поворота штока γ к максимальному γ_{max} .

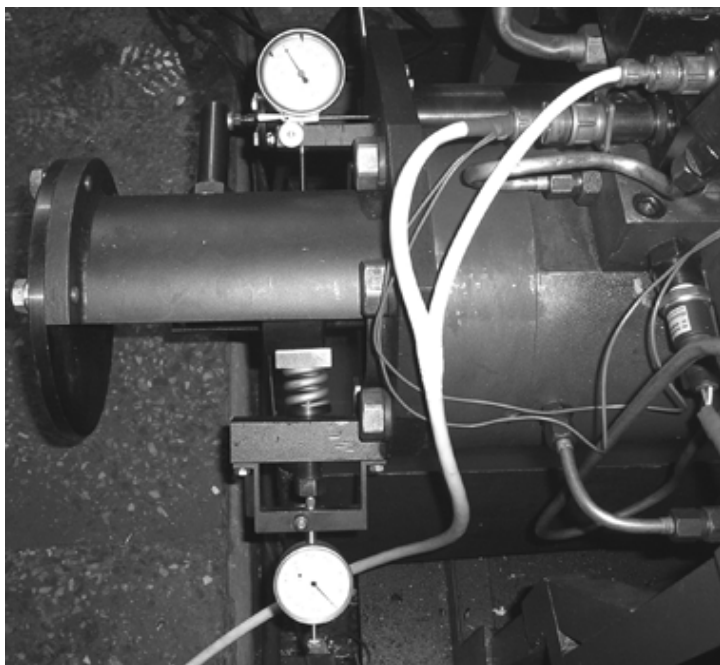


Рис. 3. Фрагмент экспериментальной установки, предназначенной для испытания гидропоры

Характеристики безразмерного расхода $\bar{Q}_{\text{ГО}} = \bar{Q}_{\text{ГО}}(\bar{\gamma})$ приведены на рис. 4, *а*, характеристики безразмерной несущей способности $\bar{P}_{\text{ГО}} = \bar{P}_{\text{ГО}}(\bar{\gamma})$ — на рис. 4, *б*. Здесь $\bar{Q}_{\text{ГО}} = \frac{Q_{\text{ГО}}}{Q_{\text{ГО0}}}$ — отношение расхода текущей жидкости $Q_{\text{ГО}}$ через ГО к расходу жидкости $Q_{\text{ГО0}}$ при концентричном расположении штока; $\bar{P}_{\text{ГО}} = \frac{P_{\text{ГОmax}}}{P_{\text{ГО}}}$ — отношение максимальной величины силы $P_{\text{ГОmax}}$, возникающей в ГО, к текущему значению силы $P_{\text{ГО}}$.

Сплошными кривыми на указанных рисунках изображены характеристики, полученные экспериментально, а штриховыми — соответствующие им характеристики, рассчитанные на ЭВМ. Сравнение результатов расчета и экспериментов, проведенных с ГО, показало отличие при концентричном расположении штока не более, чем на 6 %, в случае с перекосом штока — на 11...14 %. Такая точность для расчета динамических характеристик гидроприводов, применяемых в испытательной технике, вполне допустима.

Выводы. 1. Гидроцилиндры испытательных машин, создающих сложные динамические законы нагружения при достаточно больших скоростях перемещения штоков, целесообразно снабжать гидростатическими опорами вместо контактных уплотнений.

2. При расчете гидростатических опор следует учитывать возможный перекос штока, вызванный действием внешней радиальной на-

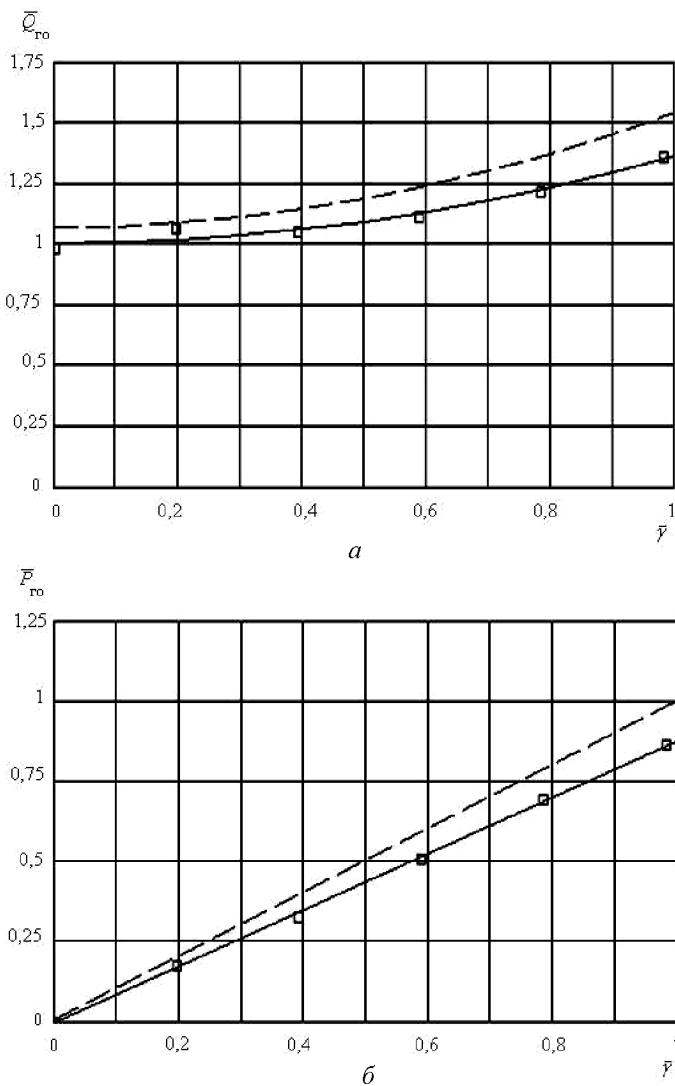


Рис. 4. Сравнительные графики безразмерных расходов жидкости через гидроопору (а) и несущей способности гидроопоры (б)

грузки. Приведенная выше методика численного исследования течения вязкой жидкости в щелях клиновидной формы позволяет определять интегральные характеристики гидростатической опоры с достаточной для практики точностью. Адекватность результатов таких расчетов реальным характеристикам гидростатической опоры подтверждена экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Кондаков Л.А., Голубев А.И., Гордеев В.В. и др.; Под общ. ред. Голубева А.И., Кондакова Л.А. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.

2. П у ш А. В. Шпиндельные узлы. Качество и надежность. – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.
3. П е ш т и Ю. В. Газовая смазка. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – 381 с.
4. Р у с а к о в А. И., П е ш т и Ю. В. Определение некоторых характеристик радиальных газодинамических сегментных подшипников для быстроходных турбомашин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. Спец. выпуск. – 1998. – С. 134–145.
5. П о п о в Д. Н., С и т н и к о в С. Л. Выбор структуры и параметров самонастраивающегося гидропривода испытательной машины // Вестник машиностроения. Сер. “Машиностроение”. – 1990. – № 1. – С. 28–31.
6. М а т е м а т и ч е с к о е моделирование гидростатических опор для штока гидроцилиндра испытательной машины / Д.С. Чвялев, Д.Н. Попов, С.Л. Ситников, Г.Ж. Сахвадзе // Научно-технические проблемы развития Московского мегаполиса: Труды Моск. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – М., 2003. – С. 1–9.
7. Л о й ц я н с к и й Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

Статья поступила в редакцию 30.06.2006

Дмитрий Николаевич Попов окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана, д-р техн.наук, профессор кафедры “Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

D.N. Popov graduated from the Bauman Moscow State Technical University. D. Sc. (Eng.), professor of "Hydromechanics, Hydraulic Machines and Hydro-pneumatic-automatics" department of the Bauman Moscow State Technical University.



Дмитрий Станиславович Чвялев родился в 1976 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000 г. Инженер ООО “Фирма “Следящие тест-системы”. Автор 4 научных работ в области гидромеханики и гидроприводов.

D.S. Chvyalev (b. 1976) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2000. Engineer of “Servo test-system” firm. Author of 4 publications in the field of the hydromechanics and hydraulic actuators.

