

зультаты анализа и совершенствования методик оценки технического состояния элементов стержневых конструкций и их устойчивости, приведенные в работах [5; 6].

Определяется амплитуда и частота собственных колебаний конструкции и сравнивается с требованиями ТЗ.

Однажды сам алгоритм расчета должен быть протестирован, а конструкция трансформируемой антенны квалифицирована на соответствие требованиям ТЗ.

Для этого проводятся испытания, при которых экспериментально определяются амплитуды и частоты колебаний конструкции. Затем находят жесткость. Определяют характеристики на соответствие требованиям ТЗ.

Предлагается в первом приближении по указанной методике определить собственную частоту колебаний зонтичной антенны в раскрытом напряженном состоянии, уточнив необходимые параметры по результатам НЭО: плотность, толщину и др.

#### Библиографические ссылки

1. Гряник М. В., Ломан В. И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. М. : Радио и связь, 1987.

2. Шатров А. К., Назарова Л. П., Машуков А. В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006.

3. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки / пер. с англ. В. И. Контовта ; под ред. Г. С. Шапиро. 2-е изд., стереотип. М. : Наука, 1966.

4. Основы строительной механики ракет : учеб. пособие для вузов / Л. И. Балабух, К. С. Колесников, В. С. Зарубин и др. М. : Высш. шк., 1969.

5. Ереско С. П., Алифанов Л. А., Морозов С. В. Анализ методик оценки технического состояния стержневых элементов металлоконструкций с несовершенствами формы // Вестник университетского комплекса / под общ. ред. Н. В. Василенко. Красноярск : ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ. 2006. Вып. 7 (21). С. 3–7.

6. Ереско С. П., Алифанов Л. А., Морозов С. В. О совершенствовании расчетных методик оценки устойчивости при проектировании металлоконструкций // Вестник университетского комплекса / под общ. ред. Н. В. Василенко. Красноярск : ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ. 2006. Вып. 8 (22). С. 190–192.

G. V. Dvirniy, S. P. Eresko

### EXPERIMENTAL AND THEORETICAL GROUND-BASED TESTING OF SPACECRAFT ANTENNAS

*In this article the authors consider design aspects of experimental-theoretical procedure, supporting the requisitions to parameters of transforming umbrella-form antennas.*

*Keywords: umbrella antenna, curve radius, flexible structure, shell, natural frequency, amplitude.*

© Двирный Г. В., Ереско С. П., 2012

УДК 532.542:621.67-762:62

М. В. Краев

### ТУРБУЛЕНТНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ «ЖИДКОСТЬ–ГАЗ» ПОЛОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ РОТОРНЫХ ГИДРОМАШИН\*

*На основе представленной картины течения в поле центробежных сил жидкости и газа в межлопаточном канале полуоткрытого рабочего колеса роторной гидромашины выполнен расчет параметров поверхности раздела «жидкость–газ» с анализами устойчивости вращающейся поверхности с экспериментальными данными.*

*Ключевые слова: рабочее колесо, вращение, вихрь, поверхность, граница раздела, жидкость–газ.*

Высокооборотные роторные гидромашин (ГМ) широко применяются в качестве агрегатов подачи различных рабочих тел в энергодвигательных установках летательных аппаратов (ЛА), ротор которых состоит из различных типов рабочих колес, дисков, узлов уплотнений, систем перепусков и т. п. [1].

Вопросам исследования гидродинамики плоскостей вращения роторных гидромашин с частично смоченной торцевой поверхности полуоткрытого рабочего колеса (РК) посвящены работы [2; 3; 4],

авторы которых принимают в расчетах, что граница раздела жидкостной и газовой фаз представляют собой размытую цилиндрическую поверхность. Такой подход приводит к существенным ошибкам в расчетах осевых сил ротора агрегата и неопределенности о работоспособности расположенных на валу уплотнительных устройств [5].

Картина течения между вращающимися РК полуоткрытого типа с радиальными лопатками и гладкими корпусами довольно сложна.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. ГК № 231 от 23.04.2010 г.

Жидкость, находящаяся в области каналов РК, подвергается непосредственно силовому воздействию лопаток. При бесконечно большом числе лопаток РК жидкость в полости вращения имеет угловую скорость  $\omega$ , вращаясь как твердое тело. При одномерном радиальном течении жидкости в каналах РК со скоростью  $V_R$  в области границы раздела «жидкость–газ» (рис. 1), на выделенный объем жидкости массой  $dm$  действует центробежная сила инерции  $dm\omega^2 R$  и сила Кориолиса  $dm2V_R$ .

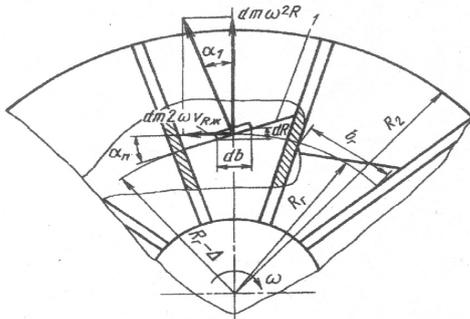


Рис. 1. Схема для определения границы раздела фаз в канале РК

Равнодействующая центробежной силы и силы Кориолиса уравнивается силой давления слоев жидкости, прилегающих к выделенному объему, и поэтому поверхность равного давления в жидкости нормальна к этой равнодействующей. Следовательно

$$\operatorname{tg}\alpha_n = \frac{dR}{db} = \frac{dm2\omega V_R}{dm\omega^2 R}. \quad (1)$$

Для одномерного расходного течения жидкости на ширине  $b$  канала РК уравнение (1) в работе [6] получено в виде величины перекоса  $\Delta$  поверхности жидкости на границе раздела фаз по ширине канала РК:

$$\Delta = \frac{2b \cdot V_R}{\omega R}, \quad (2)$$

Наряду с радиальным течением жидкости в каналах РК формируется вихревая структура потока [7],

что обуславливает вращательное движение жидкости с осью вращения, направленной по радиусу РК.

Поверхность раздела фаз в канале не совпадает с концентрической цилиндрической поверхностью. Нормаль к этой поверхности составляет с направлением радиуса РК угол  $\alpha_n$  (см. рис. 1), обусловленный соотношением перекоса  $\Delta$  и ширины канала РК. Вращательное движение жидкости в канале с угловой скоростью вихря  $\omega_v$  приводит к образованию гребня жидкости (рис. 2). Высота образовавшегося гребня жидкости увеличивается при вращении вихря и достигает наибольшего значения при повороте его на угол  $\varphi = 180^\circ$ , т. е. когда линия  $do$  занимает положение  $so$ . Гребень жидкости разрушается – срывается, когда силы инерции его вихревого движения превышает силы вязкости и поверхностного натяжения. Поскольку канал полуоткрытого РК со стороны осевого зазора  $a$  открыт, то образовавшийся над поверхностью жидкости гребень может сорваться в направлении осевого зазора  $a$ . С увеличением угла  $\varphi$  вероятность срыва увеличивается, так как увеличивается масса жидкости во вращающемся гребне. Такое положение является, на наш взгляд, причиной неустойчивости поверхности жидкости.

Будем считать, что поверхности, ограничивающие гребень, линейны и сходятся в центре вращения  $o$ , а расстояние  $ol$  от вершины гребня до центра вращения – величина постоянная.

Неустойчивость поверхности вращающегося жидкостного кольца и объем срываемой жидкости в реальных условиях будет определяться соотношением сил, способствующих срыву сил инерции, и сил, препятствующих ему (сил поверхностного натяжения, вязкости и аэродинамического сопротивления). Поскольку при движении на жидкость оказывают влияние силы вязкости и поверхностного натяжения, для срыва гребня сила инерции жидкости должна их превышать. При вращении гребня относительно поверхности жидкости будет возрастать его масса, и при достижении ее критического значения поверхность потеряет устойчивость.

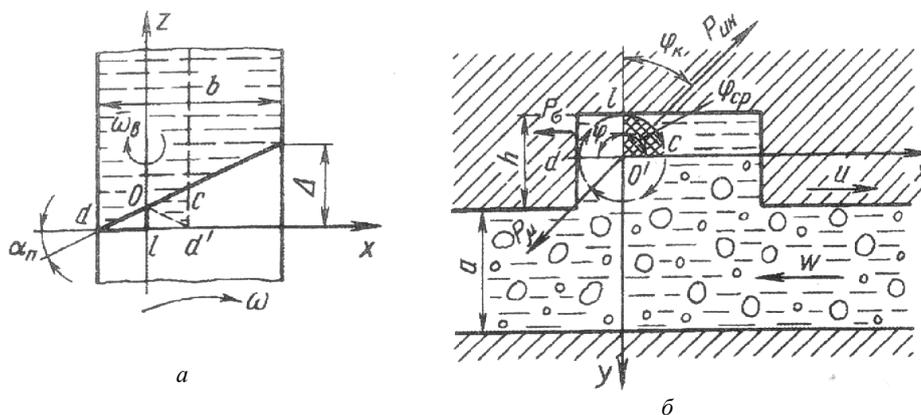


Рис. 2. Схема для пояснения механизма формирования неустойчивости: а – в плоскости вращения; б – в тангенциальной плоскости

При вращении гребня на него действует сила инерции  $P_{ин}$  вращающейся жидкости, стремящаяся разрушить гребень и направленная от центра вращения. Для недеформированного гребня

$$P_{ин} = \frac{2}{3} \rho_{ж} V_{гр} \omega_g^2 r_g \quad (3)$$

Объем гребня жидкости  $V_{гр}$  увеличивается с поворотом его на угол  $\varphi$ . Площадь поперечного сечения гребня изменяется от нулевого значения на линии  $do$  (см. рис. 2) до наибольшего значения, определяемого площадкой  $odc$ , что соответствует углу поворота гребня  $\varphi = 180^\circ$ .

При увеличении границы срыва возрастают силы поверхностного натяжения, стремящиеся уменьшить линейные размеры гребня и удержать его от срыва, и сила аэродинамического сопротивления. С увеличением площади срыва возрастают силы вязкости, препятствующие срыву. Кроме того, до сечения, соответствующего углу поворота гребня  $\varphi = \pi/2$ , гребень от срыва удерживается стенками канала полуоткрытого РК. При дальнейшем повороте гребень выходит из канала РК. Вероятность срыва гребня увеличивается и будет наибольшей при достижении им сечения  $od'c$ .

Сила поверхностного натяжения  $P_\sigma$ , действующая на гребень, направлена по касательной к его профилю в месте срыва (при  $\varphi = \pi/2$ ). В момент срыва

$$P_\sigma = \sigma_{ж} r_{ж} \cos \varphi_k \frac{1 + \sin \alpha_n}{\cos \alpha_n}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{ж}$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $\varphi_k$  – угол между вертикалью и направлением силы инерции в момент срыва.

Выражение для силы вязкости  $P_\mu$ , действующей в плоскости среза гребня, для слоя, в котором появляется ее действие, получим, приняв, что на внешней границе этого слоя сила трения равна нулю, а толщина постоянная вдоль радиуса и определяется формулой [8]

$$\delta_o = 3,7 \sqrt{v_{ж} / \omega_g}. \quad (5)$$

Тогда

$$P_\mu = \mu_{ж} \omega_g^{1,5} r_g^3 F_{ср} / (3,71 v_{ж}^{0,5}), \quad (6)$$

где  $F_{ср}$  – площадь действия сил вязкости в момент срыва. Из геометрических соотношений следует, что

$$F_{ср} = \frac{r_g^2}{2 \cos \alpha_n} \left[ \arctg(\cos \alpha_n \operatorname{tg} \varphi_{ср}) \right]. \quad (7)$$

Выражение (6) при  $\varphi_{ср} = \pi/2$  будет иметь вид

$$P_\mu = \mu_{ж} \frac{\pi \omega_g^{1,5} r_g^3}{14,84 v_{ж}^{0,5} \cos \alpha_n}. \quad (8)$$

Анализ изменения силы аэродинамического сопротивления показал, что она (см. рис. 2, б, заштрихованный сектор) составляет 0,1...0,3 % от  $P_{ин}$ . Это дает основание ей пренебречь.

Срыв гребня жидкости произойдет, когда внутренние силы жидкости не смогут удержать его в состоянии вращения. В этот момент произойдет деформация слоя гребня, и он разрушится. При срыве гребня должно выполняться условие

$$P_\mu + P_\sigma < P_{ин}. \quad (9)$$

В момент срыва гребень будет деформироваться, стремясь принять форму, при которой сопротивление срыву будет максимальным. Формой и размерами профиля в месте срыва гребня будет определяться максимальная сила поверхностного натяжения, совпадающая с направлением деформации гребня:

$$P_\sigma = \sigma_{ж} r_g \left( \frac{1 + \sin \alpha_n}{\cos \alpha_n} \right). \quad (10)$$

Так как периметр сечения гребня в момент срыва определяется его положением в плоскости срыва, запишем условие неустойчивости для этого сечения. Примем, что силы инерции и вязкости у деформированного и недеформированного гребня при прочих равных условиях одинаковы. Силами, затраченными на разрыв жидкости, пренебрежем. Тогда в момент срыва удовлетворяется условие

$$\begin{aligned} \frac{\mu_{ж} \omega_g^{1,5} r_g^3 \varphi_{ср}}{4,72 v_{ж}^{0,5} \cos \alpha_n} + \sigma_{ж} r_g \frac{1 + \sin \alpha_n}{\cos \alpha_n} &\leq \\ &\leq \frac{2}{3} \rho_{ж} \omega_g^2 \operatorname{tg} \alpha_n \left( \frac{\varphi_{ср}}{3} + \frac{\sin \varphi_{ср}}{2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Выражения (2) и (11) позволяют оценить условия, при которых формируется условие неустойчивости поверхности вращающейся жидкости.

Для условия неустойчивости, т. е. для  $\varphi_{ср} = \pi/2$  и  $r_g = h/2$ , получим

$$\begin{aligned} 0,265 \rho_{ж} v_{ж}^{0,5} h^3 \omega^{1,5} + 0,5 \sigma_{ж} h (1 + \sin \alpha_n) &= \\ = 0,0384 \rho_{ж} h^4 \sin \alpha_n \omega_g^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Экспериментальные точки, полученные при визуальном наблюдении за устойчивостью поверхности в канале РК для воды при  $t 20^\circ \text{C}$ , хорошо согласуются с теоретической зависимостью (рис. 3).

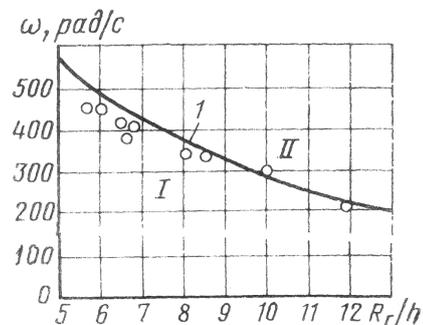


Рис. 3. К расчету границы и области неустойчивости поверхности «жидкость–газ»: I – область устойчивой поверхности; II – область неустойчивости; 1 – расчетное значение границы неустойчивости

Определение начала разрушения поверхностного слоя жидкости на границе раздела фаз или границы области неустойчивого гребня проводилось визуально при освещении границы раздела фаз строботометром.

Для оценки влияния физических свойств жидкости на границу неустойчивости испытания проводились холодной и подогретой водой, температура которой регулировалась расходом жидкости через полости вращения РК и контролировалась термометром.

Испытания проводились в двух вариантах. В одном варианте за постоянную величину принимали угловую скорость и увеличивали значение радиуса  $R_r$ . При этом фиксировали момент срыва капля. Далее фиксировали момент, когда капли на границе раздела фаз отсутствовали. Аналогично проводили испытания, принимая значения  $R_r = \text{const}$  и варьируя угловую скорость РК.

#### Библиографические ссылки

1. Краева Е. М. Высокооборотные центробежные насосные агрегаты : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011.
2. Кеттола Н., Мак-Грю М. Теория частично смоченного вращающегося диска // Проблемы трения и смазки : тр. АОИМ. М. : Мир, 1986. Т. 30. Сер. F. С. 86–102.
3. Third M. T., Saynders M. G. The hydrodynamic disk seal. Third international conference on fied sealing. England : Cambridge, 1967. P. 97–124.
4. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М. : Физматгиз, 1960.
5. Байбиков А. С., Караханьян В. К. Гидродинамика вспомогательного тракта лопастных машин. М. : Машиностроение, 1982.
6. Краев М. В., Протевень И. С. Структура поверхности раздела частично смоченного диска с радиальными лопатками // Вестник СибГАУ. Вып. 3 (36), 2011. С. 113–116.
7. Масич И. С., Краева Е. М. Вихревые структуры турбулентных потоков и их моделирование // Вестник СибГАУ. Вып. 1 (34). С. 107–111.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1969. 774 с.

M. V. Kraev

#### TURBULENT UNSTEADINESS OF «LIQUID–GAS» SURFACE OF CAVITIES OF ROTATION OF HYDROMACHINES ROTORS

*On the basis of the stipulated picture of a current in a field of centrifugal forces of liquid and gas in inter blade channel of a semiexposed driving wheel of a rotor hydro-machine, the author calculate the parameters of «liquid–gas» surface with the analysis of stability of a rotating surface with experimental data.*

*Keywords: driving wheel, rotation, whirlwind, surface, interface, «liquid–gas».*

© Краев М. В., 2012

УДК 539.3

В. А. Лавренов, А. В. Кацура

#### ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЭКСПОЗИЦИИ И ПЕРИОДА ЭКСПЛУАТАЦИИ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПЛАНЕРА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Ресурс основных частей планера летательного аппарата (ЛА) определяется усталостной долговечностью деталей с концентраторами напряжений, работающих в условиях повторно-циклических деформаций растяжения или растяжения–сжатия. Основное повреждение в конструкционный материал вносят нагрузки растяжения.*

*Ключевые слова: деформирование, прочность, долговечность, термоэкспозиция.*

Снижения уровня напряжений, действующих в зонах концентраторов, можно добиться увеличением площади расчетных сечений деталей при растяжении, сжатии, сдвиге, моментах сопротивления (разнесением сечения) при изгибе или кручении, увеличением количества крепежных элементов в заклепочных или болтовых соединениях. Но эти меры связаны со значительным увеличением веса или габаритов конст-

рукций, уменьшением полезных объемов, что в авиации неприемлемо.

Эффективным способом повышения характеристик сопротивления усталости элементов конструкции планера ЛА стало создание в зонах концентрации напряжений полей остаточных напряжений обратного опасным с позиций сопротивления усталости эксплуатационным напряжениям знака (остаточных на-