

Библиографические ссылки

1. Краева Е. М. Высокооборотные насосы аэрокосмических систем малого расхода : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005.
2. Кетолла Н., Мак-Грю М. Теория частично смоченного вращающегося диска // Проблемы трения и смазки : труды АОИМ. М. : Мир, 1986. Т. 30. Сер. Ф. № 2. С. 86–102.
3. Third M. T., Saunders M. G. The hydrodynamic disk seal. Third international conference on flid sealing. England : Cambridge, 1967. P. 97–124.
4. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. М. : Физматгиз, 1960.
5. Байбиков А. С., Карахатян В. К. Гидродинамика вспомогательного тракта лопастных машин. М. : Машиностроение, 1982.
6. Краев М. В., Краева Е. М. Исследование вихревых турбулентных потоков в поле центробежных сил // Вестник СибГАУ. Вып. 4(30). 2010. С. 111–114.
7. Краев М. В., Овсяников Б. В., Шапиро А. С. Гидродинамические радиальные уплотнения высокооборотных валов. М. : Машиностроение, 1967.

M. V. Kraev, I. S. Proteven

THE STRUCTURE OF THE INTERFACE PARTIALLY WET DISC WITH RADIAL VANES

Based on the representations of the flow pattern of the working fluid in the channels of the disc with blades, we calculated the main parameters of the «liquid–gas», with proven experimental data.

Keywords: disc, rotation, channels, surface, border, liquid–gas.

© Краев М. В., Протевень И. С., 2011

УДК 621.45–181.4:629.78

Е. М. Краева

ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В РЕШЕТКЕ ПРОФИЛЕЙ ЛОПАТОК ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ГИДРОМАШИНЫ*

Представлен расчет потока вязкой жидкости решетки профилей лопаток центробежного рабочего колеса. Получены зависимости изменения параметров пограничного слоя вдоль входных кромок лопаток решетки профилей центробежной гидромашины. Выполнены расчеты с учетом вязкости для ряда рабочих вязкостей.

Ключевые слова: гидродинамика потока, модель, турбулентность, параметры, поток, вязкость, рабочая решетка, лопатка.

Из анализа различных схем обтекания лопаток центробежных насосов (ЦБН) [1; 2] рассмотрим схему малорасходного режима, когда точка раздвоения линии тока совпадает с угловой точкой E (рис. 1, поз. II), в которой пересекаются входная и боковая кромки профиля лопатки.

Поток в каналах рабочего колеса (РК) ЦБН формируется при обтекании входных кромок лопаток, имеющих конечную толщину $\delta_{\text{л}}$ с прямой формой входной кромки или в виде клина длиной $l_{\text{кл}} \leq 10$ мм, величиной $\sigma_1 \leq 2$ мм, образуемой в результате пересечения лопатки с окружностью входа в РК радиусом R_1 и углом установки $\beta_{1\text{л}}$ средней линии профиля лопатки. На напорной стороне лопатки пограничный слой не только определяется характеристиками набегающего потока, но и оказывает на него обратное влияние через толщину вытеснения δ^* , что приводит к изменению гидродинамического угла установки лопатки от геометрического на величину $\Delta\beta_{\text{л}}$ (рис. 2).

Оценим влияние вытесняющего действия пограничного слоя в области входа на лопатку. С учетом толщины вытеснения пограничного слоя набегающего потока, угол натекания гидродинамического потока вязкой жидкости значением угла натекания потока составит:

$$\beta = \beta_{1\text{л}} + \arctg \frac{\delta^*}{l_{\text{кл}}} \quad (1)$$

где δ^* – толщина вытеснения, которую можно оценить, используя известные из теории пограничного слоя соотношения при обтекании с градиентом давления [3].

Следует отметить, что конечная толщина лопатки и параметры ее входной кромки не только формируют поток на входе в межлопаточный канал, но и оказывают на него подтормаживающее действие за счет силы реакции F и стесняющее – за счет конечной толщины лопатки $\delta_{\text{л}}$ с учетом суммарной площади лопаток на входе.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП НК-711 П.1.2.1. ГК № П231 от 23.04.2010 г. и при участии доктора технических наук М. В. Краева.

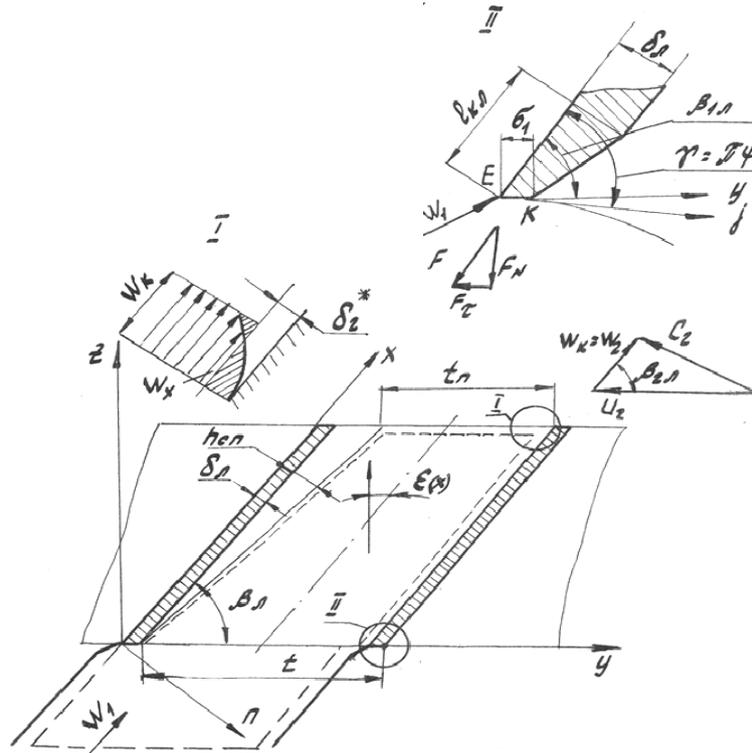


Рис. 1. Расчетная схема обтекания решетки прямых профилей

Полную силу F , действующую на поток со стороны кромки, можно разложить на две составляющие: F_N – нормальную к входной кромке и F_τ – касательную, которая представляет собой силу трения, определяемую вязкостью жидкости. Сила F_N рассчитывается по закону распределения давления вдоль входной кромки лопатки величиной σ_1 :

$$F_N = \int_0^{\sigma_1} P dj. \quad (2)$$

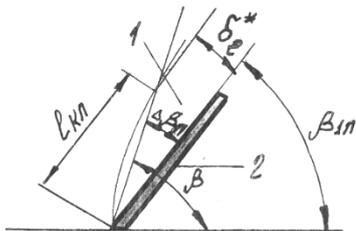


Рис. 2. Расчетная схема угла натекания потока на лопатку: 1 – пограничный слой; 2 – лопатка

Рассмотрим, следуя авторам работы [1], обтекание лопатки с входной кромкой, которая может не совпадать с фронтом решетки, как обтекание окрестности передней критической точки клинообразного тела с углом раствора $\gamma = \pi\psi$. Согласно [3], скорость потенциального течения в ядре потока вдоль входной кромки будет иметь вид

$$W_{(j)} = Cj^m, \quad (3)$$

где C и m – постоянные величины,

$$m = \frac{\Psi}{2 - \Psi} = \frac{\gamma}{2\pi - \gamma}. \quad (4)$$

При совпадении входной кромки с осью Y ($\gamma = \beta_{1,0}$):

$$m = \frac{\beta_{1,0}}{2\pi - \beta_{1,0}}. \quad (5)$$

Тогда для клина с углом раствора $\pi\psi$ и длиной одной стороны входной кромки равной σ_1 при $j = \sigma_1$; $W_{(j)} \approx W_K$ из уравнения (3) получим:

$$C = \frac{W_K}{\sigma_1^m}; \quad (6)$$

и запишем уравнение (3) следующим образом:

$$W_{(j)} = \frac{W_K}{\sigma_1^m} j^m. \quad (7)$$

Решение уравнения пограничного слоя проводим с учетом градиентного обтекания лопатки, принимая согласно [4], что по всей длине входной кромки σ_1 пограничный слой ламинарный. Для оценки закона изменения толщины потери импульса δ_1^{**} вдоль входной кромки лопатки используем выражение из работы [3], сведенное к простой квадратуре:

$$(\delta_1^{**})^2 = \frac{0,47\nu}{W_{(j)}^6} \int_0^j W_{(j)}^5 dj. \quad (8)$$

Откуда, с учетом (7), имеем

$$\delta_1^{**} = 0,686 \sqrt{\frac{\sigma_1^m \nu j^{(1-m)}}{W_K (5m+1)}}. \quad (9)$$

Используя табличную функцию $f_1(\alpha)$, предложенную Г. Хольштейном и Т. Боленом [3], принимаем

$$f_1(\alpha) = \frac{\delta^*}{\delta^{**}}, \quad (10)$$

тогда изменение толщины вытеснения пограничного слоя δ_1^* вдоль входной кромки лопатки запишем в виде

$$\delta_1^* = f_1(\alpha) \delta_1^{**}, \quad (11)$$

где значение формпараметра α запишем следующим образом:

$$\alpha = \frac{(\delta_1^{**})^2}{\nu} \cdot \frac{dW_{(j)}}{dj} = \frac{m}{(10,64m+2,128)}. \quad (12)$$

Для постоянного угла заострения входной кромки лопатки $\gamma = \pi\psi$ из выражения (12) видно, что $f_1(\alpha)$ не изменяется вдоль всей входной кромки.

На примере конкретных РК ЦБН для входной кромки решетки профилей лопатки, касательной к окружности входа РК в точке Е ($\gamma = \beta_{1л}$), проведены расчеты изменения параметров пограничного слоя: толщины вытеснения δ_1^* и толщины потери импульса δ_1^{**} вдоль кромки лопатки в зависимости от значения относительной скорости набегающего потока W_y .

Расчитанные по уравнению (7) значения изменения относительной скорости потока при обтекании решетки профилей с клином входной кромки РК параметров: $R_1 = 8,25$ мм, $R_2 = 20,25$ мм, шагом решетки $t_{1пр} = 14,95$ мм и ширины $b_1 = 4,3$ мм приведены на рис. 3 для трех значений углов установки лопатки $\beta_{1л} = 18^\circ; 30^\circ$ и 40° . Скорость потока W_y вначале резко возрастает до 60...80 % на длине, составляющей 10 % всей кромки, а затем медленно увеличивается, достигая на остальной длине значения W_K . При этом следует отметить, что с ростом угла установки профиля темп нарастания скорости W_y уменьшается.

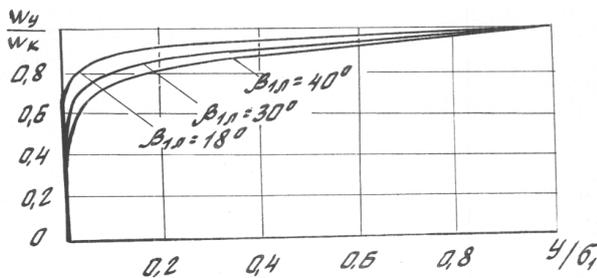


Рис. 3. Результаты расчета изменения $\left(\frac{W_y}{W_K}\right)$ на входе решетки профилей лопаток

Для широкого диапазона изменения параметров рабочих тел с вязкостью $\nu = 0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с проанализируем реальность перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный для РК с углом $\beta_{1л} = 30^\circ$; угловой скоростью $\omega = 800$ рад/с и относительной скоростью потока $W_1 = 3$ м/с. Течение у входной кромки лопатки длиной σ_1 и вдоль ее напорной поверхности принимается эквивалентным обтеканию клина с углом раскрытия γ (рис. 1, поз. II).

Расчет устойчивости течения рассмотрим для профиля скоростей, рассчитанных способом К. Польгаузена с формой профилей, определяемых безразмерным параметром [3]:

$$\Lambda = \frac{\delta^2}{\nu} \frac{dW_y}{dy}, \quad (13)$$

зависимость которого от критического числа Рейнольдса определяем по толщине вытеснения пограничного слоя:

$$Re_{кр\delta^*} = \frac{W_{(y)} \delta^*}{\nu}. \quad (14)$$

При значении $Re_{\delta^*} > Re_{кр\delta^*}$ ламинарный пограничный слой переходит в турбулентный.

Между безразмерными параметрами α (формула (12)) и Λ существует известное универсальное соотношение [3]:

$$\alpha = \Lambda \left(\frac{37}{315} - \frac{\Lambda}{945} - \frac{\Lambda^2}{9072} \right). \quad (15)$$

Для входной кромки лопатки с углом $\beta_{1л} = \gamma = 30^\circ$ расчеты по приведенным выше зависимостям дают $m = 0,0908$, тогда $\alpha = 0,029$, что соответствует $\Lambda = 2,243$ и $f_1(\alpha) = 2,457$.

Имеем, что $Re_{кр\delta_1^*} = 2,65 \cdot 10^3$ (рис. 17.3 работы [3]).

Толщину вытеснения для конца участка клина ($j = \sigma_1$) оценим по выражению (9) и с учетом (10) получим

$$\delta_{1(30^\circ)}^* = 1,398 \left(\frac{\nu \sigma_1}{W_K} \right)^{0,5} \quad (16)$$

или

$$Re_{\delta_1^*} = \frac{W_K \delta_1^*}{\nu} = 1,398 \left(\frac{W_K \sigma_1}{\nu} \right)^{0,5}. \quad (17)$$

На основе анализа расчетной величины формпараметра (α), в зависимости от m , в практическом диапазоне изменения углов установки лопатки от 18 до 40° рассмотрим влияние на толщину вытеснения пограничного слоя и значение $Re_{\delta_1^*}$. Из дальнейшего анализа для принятого угла $\beta_{1л} = 30^\circ$ при $Re_{кр\delta_1^*} = 2,65 \cdot 10^3$ и входной кромки $\sigma_1 = 2$ мм, получим: для воды ($\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с) $W_K = W_{Ккр} = 1598$ м/с; для глицерина ($\nu = 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с) $W_K = W_{Ккр} = 1598 \cdot 10^2$ м/с. Следует отметить, что расчетные значения относительной скорости, при которой реализуется переход к турбулент-

ному пограничному слою, на три и более порядков выше реальных значений W_K по всей длине решетки профилей лопаток исследуемой центробежной гидромашины с параметрами: $\sigma_1 = 2$ мм и $l_{np} = 18,6$ мм для вышеприведенных значений РК ($\beta_{1л} = 30^\circ$; $\beta_{2л} = 70^\circ$) ЦБН, работающего на ряде рабочих жидкостей. Расчетные значения изменения параметров толщины вытеснения δ_1^* и толщины потери импульса δ_1^{**} пограничного слоя вдоль рабочей решетки профилей лопаток центробежной гидромашины приведены на рис. 4 для ряда рабочих жидкостей: вода ($\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\rho = 10^3$ кг/м³), глицерин ($\nu = 1,18 \cdot 10^{-3}$ м²/с; $\rho = 1,26 \cdot 10^3$ кг/м³), водный раствор глицерина ($\nu = 10^{-4}$ м²/с; $\rho = 1,23 \cdot 10^3$ кг/м³), ЛЗ-ТК-2 при $t = +20$ °С ($\nu = 0,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\rho = 691$ кг/м³) и при -100 °С ($\nu = 1,55 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\rho = 784$ кг/м³).

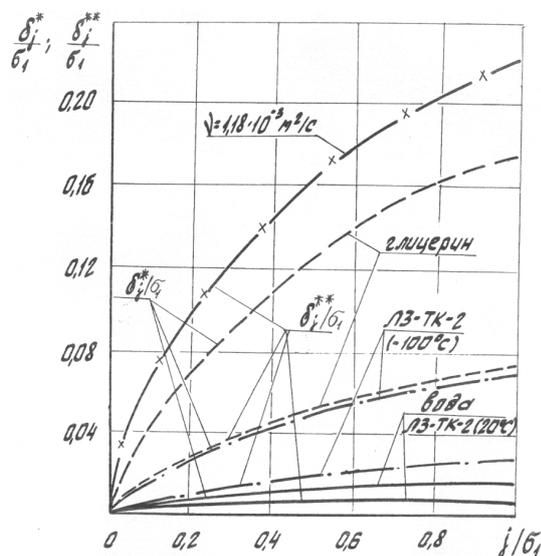


Рис. 4. Изменение параметров пограничного слоя вдоль рабочей решетки профилей по входной кромке лопатки

Из графиков видна существенная зависимость роста δ_1^* и δ_1^{**} с увеличением вязкости рабочей среды. Так, при течении глицерина на кромке лопатки величина толщины вытеснения δ_1^* составила 22,5 % от длины входной кромки σ_1 . При этом от носика входной кромки значение δ_1^* вначале резко возрастает, достигая для всех рабочих жидкостей на половине длины кромки 75 % своего конечного значения.

Следует отметить, что проведенный анализ и расчеты параметров пограничного слоя в каналах РК МН проводились на основе приближенного решения уравнений пограничного слоя, предложенного К. Польгаузенном [3]. Обтекание входной кромки лопатки рабочей решетки профилей принималось эквивалентно обтеканию потоком вязкой жидкости окрестности передней критической точки клина с углом раскрытия γ . При анализе пограничных слоев на каждой из поверхностей канала решетки РК пренебрегалось эффектами, связанными с течением в углах. Такое до-

пущение при течении в геометрически диффузорном канале общепринято [2] и позволяет моделировать реальную ситуацию с достаточной точностью.

Очевидно, что качество приближенного расчета будет зависеть от степени точности выбранного распределения профиля скоростей:

$$\frac{W}{W_K} = f\left(\frac{z}{\delta(z)}\right) = f(\eta), \quad (18)$$

где $\eta = \frac{z}{\delta(z)}$ – безразмерное расстояние от стенки,

полученное делением размерной величины расстояния z по нормали от тела на толщину пограничного слоя $\delta(z)$. Сама функция $f(\eta)$ зависит только от η , чем выражается предположение об аффинности профилей скоростей [3].

Приближенный метод расчета параметров пограничного слоя в решетке профилей лопаток центробежной гидромашин имеет допущения, связанные, в частности, с расчетом не каждой отдельной струйки потока, а решения дифференциальных уравнений пограничного слоя только по средним его параметрам. Приемлемость подобного приема можно проверить, выполнив для сравнения (точные) автомодельные решения уравнений пограничного слоя. Известно, что рассмотренные классы течения имеют аффинно-подобные профили скоростей, что позволяет выполнить точные решения уравнений пограничного слоя, так называемые автомодельные решения. Точное решение задачи осесимметричного течения для рассматриваемого случая обтекания клина в решетке профилей выполнил Д. Хартри. В работе [1] при анализе течения около передней точки клиновидного тела для двух значений $\gamma = 0$; ($m = 0$) и $\gamma = 36^\circ$, ($m = 0,11$) (см. формулу (4)) показано практическое совпадение профилей скорости, полученных при точном и приближенных решениях. Полученные решения позволяют с достаточной точностью определить силы трения и гидравлические качества РК ЦБН с учетом реальной гидродинамической картины течений потока вязкой жидкости в решетке профилей лопаток центробежной гидромашин.

Библиографические ссылки

1. Петров В. И., Чебаевский В. Ф. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. М.: Машиностроение, 1982.
2. Высокооборотные лопаточные насосы / Б. И. Боровский, Н. С. Ершов, Б. В., Овсянников и др.; под ред. Б. В. Овсянникова, В. Ф. Чебаевского. М.: Машиностроение, 1975.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
4. Краева Е. М. Теоретический анализ обтекания решетки профилей малорасходных центробежных насосов потоком вязкой жидкости // Вестник СибГАУ. Вып. 1(27). 2010. С. 96–99.

Е. М. Краева

HYDRODYNAMICS OF VISCOUS FLUID FLOWS IN THE LATTICE OF PROFILES BLADES OF CENTRIFUGAL HYDRAULIC MACHINE

The calculation of a viscous fluid flow profile cascade vanes of a centrifugal impeller is represented. The dependencies of parameters of the boundary layer along the edges of the input grating blade centrifugal hydraulic profiles are obtained. The calculations for a number of working viscosities.

Keywords: hydrodynamics flow, model, turbulence, parameters, flow, viscosity, working lattice, blade.

© Краева Е. М., 2011

УДК 621.396.677

А. С. Першин, Е. Ю. Узолин

АДАПТИВНЫЕ МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ ОАО «ИСС»

Приведен один из вариантов исполнения адаптивной антенны, позволяющий эффективно подавлять помеху с заданного направления при сохранении уровня сигнала в большей части зоны обслуживания.

Ключевые слова: космический аппарат, адаптивные многолучевые антенны, кластер.

Развитие современных антенных систем, в том числе военной связи, потребовало обеспечения высокой помехозащищенности антенной системы от направленных помех. При использовании классических многолучевых антенн (МЛА), где схема антенно-фидерной системы (АФС) построена по принципу «облучатель–луч», защита от помехи осуществляется отключением приемника для заданного луча. Однако, это также лишало связи или приводило к значительному ухудшению качества связи тех, кто находился в зоне отключения сигнала [1].

Решением данной проблемы стало развитие адаптивных антенных систем. Принципиальное отличие данных систем заключается в том, что они позволяют подавлять помеху в определенной зоне, но при этом, не ухудшают качество связи для остальных абонентов. Несмотря на то, что адаптивные антенные системы используют антенны различных типов, их можно разделить на 3 основных класса:

- адаптивная фазированная антенная решетка (АФАР);
- адаптивная многолучевая антенна (АМЛА);
- их вариации.

Одно из направлений использования таких антенн – это установка их на космические аппараты (КА). В нашей стране использование адаптивных антенн на КА – это только перспектива. Преимуществом АМЛА над АФАР является возможность обеспечить покрытие всей зоны обслуживания (ЗО) набором узких высокоэнергетических лучей, обеспечивающим высокое качество связи, а при возникновении помех эффективно подавлять помеху. Кроме того, подавление сигнала в АМЛА осуществляется в главном лепестке диаграммы направленности антенны.

В данной статье будет рассмотрен один из примеров реализации АМЛА и представлены возможности подавления направленных помех в заданной зоне.

Данная адаптивная антенная система должна обеспечивать работу в двух режимах:

- многолучевой режим;
- режим подавления.

Данные режимы при их совмещении могут существенно дополнять друг друга. Так, в мирное время наиболее предпочтительной является многолучевая концепция, позволяющая организовывать связь с абонентами во всей зоне обслуживания вплоть до глобальной. Кроме того, существует возможность двойного использования данного режима (в мирное время) выделяя часть ресурса для средств гражданской связи. При этом для части ячеек облучателя МЛА, которые не требуют противопомеховой защиты, спутниковая обработка сигналов может быть отключена, что позволит использовать коммерческие пользовательские терминалы [2]. На рис. 1 приведен габаритный эскиз адаптивной многолучевой антенны, работающей в Ка-диапазоне частот.

АМЛА Ка-диапазона (диаметр рефлектора $D = 400$ мм, фокусное расстояние $F = 985$ мм), имея в своем составе 61-элементную облучающую решетку, по схеме «излучатель–луч» формирует 61 луч шириной $1^\circ \times 1^\circ$, набор которых покрывает зону $5^\circ \times 5^\circ$. Блок формирования диаграммы направленностей (ДН) позволяет формировать провалы в ДН для обеспечения подавления помехи. Блок формирует кластер, состоящий из определенного количества рупоров, от 7 до 37 облучателей. Каждый элемент запитывается синфазно и равноамплитудно.

При отсутствии помехи антенна работает в режиме МЛА по схеме «облучатель–луч». При появлении помехи формируется кластер, состоящий из 7–19 элементов для подавления помехи. Для облучателя, на котором наблюдается превышение уровня «сигнал/шум», система формирует варианты подавления сигнала в пределах луча методом перебора вариантов. Для случая с одной помехой система использует заранее