

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЕ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ГИДРОМАШИНЫ

О. Н. Хорев

Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Отдел гидроаэромеханики энергетических машин
Институт проблем машиностроения
им. А.Н. Подгорного НАН Украины
ул. Дм. Пожарского, 2/10,
г. Харьков, Украина, 61046
Контактный тел.: (057) 349-47-91
E-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua

Наведено результати розрахункового дослідження просторої течії в'язкої рідини в моделі спіральної камери оборотної радіально-осевої гідромашини у турбінному режимі. Розрахунки проведено за допомогою програмного комплексу FlowER-U. Виконано аналіз структури потоку та його порівняння з результатами експериментальних досліджень на гідродинамічному стенді

Ключові слова: чисельне моделювання, в'язка течія, спіральна камера, гідромашина

Представлены результаты расчетного исследования пространственного течения вязкой жидкости в модели спиральной камеры обратимой радиально-осевой гидромашини в турбинном режиме. Расчеты проведены с помощью программного комплекса FlowER-U. Выполнен анализ структуры потока и его сравнение с результатами экспериментальных исследований на гидродинамическом стенде

Ключевые слова: численное моделирование, вязкое течение, спиральная камера, гидромашин

1. Введение

Повышение эффективности гидротурбинного оборудования является важной экономической задачей. В настоящее время КПД гидромашин доведен до высокого уровня и его дальнейшее повышение возможно только в результате тщательного изучения пространственной структуры потока во всех элементах проточной части (ПЧ). При проектировании ПЧ широко используют расчетные и экспериментальные методы исследования. В последние годы в связи с разработкой более совершенных математических моделей течения, численных методов и алгоритмов, наметилась тенденция расширения численных исследований с целью снижения объема экспериментальных исследований на гидродинамическом стенде.

Спиральная камера (СК) в гидромашине является одним из важных элементов ПЧ, она имеет сложную пространственную форму. СК формирует поток, поступающий в последующие элементы ПЧ гидромашин. Она должна обеспечить равномерное поле скоростей как по высоте канала, так и по углу охвата, с требуемой циркуляцией перед рабочим колесом (РК). Такое течение имеет сложную пространственную структуру, а его характеристики существенно влияют на потери энергии в статоре, направляющем аппарате (НА), РК, отсасывающей трубе и на энергетические показатели гидротурбины в целом. Изучение характеристик течения позволяет установить зоны повышенных гидравлических потерь энергии и найти способы их уменьшения.

Применяемые в настоящее время в инженерной практике методы проектирования СК и расчета потока

в них основаны на допущениях о потенциальном течении идеальной жидкости. Это не позволяет получить реальные характеристики потока, необходимые для оптимального проектирования последующих элементов проточной части.

В работе представлены результаты численного исследования течения жидкости в спиральной камере обратимой гидромашини на напор $H=200$ м в турбинном режиме, проведенного с помощью программного комплекса FlowER-U. Данный комплекс позволяет моделировать пространственные вязкие течения несжимаемой жидкости в ПЧ гидротурбин. Получены характеристики потока в СК и проведено сравнение с результатами зондовых исследований на гидродинамическом стенде.

2. Объект и режимы исследования

Расчетное исследование течения жидкости выполнено в СК обратимой гидромашини с диаметром РК $D_1=0,350$ м при напоре $H=1$ м только для турбинного режима. СК с углом охвата в плане $\varphi_{сп}=360^\circ$ имела круглые меридиональные сечения, рассчитанные по закону постоянства момента скорости $V_t \times r = const$. Скоростной коэффициент во входном сечении спирали $K=0,95$. Высота канала в области НА $b_0=0,108D_1$, а в области входных кромок статорных колонн $b_1=0,216D_1$. Кольца статора тороидальной формы, число колонн $z_{ст}=16$, включая зуб спирали. Расчетное исследование течения выполнено в СК при значениях приведенного расхода, соответствующих режимам экспериментальных испытаний на гидродинамическом стенде ИПМаш: без

учета решетки статора $Q_I'=314,3$ л/с и с учетом статорных колонн при $Q_I'=235$ и $314,3$ л/с.

В качестве граничных условий при расчетных исследованиях задавались:

- на входе в спиральную камеру – вектор скорости потока;
- на стенках – условие прилипания (скорость равна нулю);
- на выходе из спиральной камеры – статическое давление.

Исследуемая спиральная камера отображается на расчётную область с помощью сетки общим числом ячеек около 1,2 млн.

3. Математическая модель. Численный метод.

Моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости в СК гидромашин выполнено на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с дополнительным членом, содержащим искусственную сжимаемость [1]

$$\frac{Q}{t} + \frac{1}{J_*} \left(\frac{J_*(E_i + E_v)}{\xi} + \frac{J_*(F_i + F_v)}{\eta} + \frac{J_*(G_i + G_v)}{\zeta} \right) = H,$$

где

$$Q = \left(\frac{P}{\beta} \quad u \quad v \quad \omega \right)^T, P = \frac{p}{\rho_*},$$

$$H = \left(0 \quad 0 \quad 2\omega\Omega + y\Omega^2 \quad 2v\Omega + z\Omega^2 \right)^T,$$

$$E_i = \left(U, uU + \xi_x P, vU + \xi_y P, \omega U + \xi_z P \right)^T,$$

$$E_v = \left(0, \tau_{\xi\xi}, \tau_{\xi\eta}, \tau_{\xi\zeta} \right)^T,$$

$$F_i = \left(V, uV + \eta_x P, vV + \eta_y P, \omega V + \eta_z P \right)^T,$$

$$F_v = \left(0, \tau_{\eta\xi}, \tau_{\eta\eta}, \tau_{\eta\zeta} \right)^T,$$

$$G_i = \left(W, uW + \zeta_x P, vW + \zeta_y P, \omega W + \zeta_z P \right)^T,$$

$$G_v = \left(0, \tau_{\zeta\xi}, \tau_{\zeta\eta}, \tau_{\zeta\zeta} \right)^T,$$

$$U = \xi_x u + \xi_y v + \xi_z \omega,$$

$$V = \eta_x u + \eta_y v + \eta_z \omega,$$

$$W = \zeta_x u + \zeta_y v + \zeta_z \omega,$$

$$\xi = \xi(x, y, z), \eta = \eta(x, y, z), \zeta = \zeta(x, y, z).$$

Здесь Ω – угловая скорость вокруг оси x ; Q – вектор консервативных переменных; E_i, F_i, G_i – конвективные (невязкие) составляющие потоков; E_v, F_v, G_v – диффузионные (вязкие) составляющие потоков; x, y, z, t – декартовы координаты и время; ξ, η, ζ – обобщённые криволинейные координаты; J_* – якобиан преобразования координат; $P, p, u, v, \omega, \rho_*, \beta$ – кинематическое давление, давление, декартовы компоненты скорости,

плотность и коэффициент искусственной сжимаемости соответственно. Предполагается, что температура жидкости постоянна.

Моделирование турбулентных эффектов выполнялось с помощью дифференциальной двухпараметрической модели Менгера (SST) [2].

Численное интегрирование уравнений проводится с помощью неявной квазимонотонной схемы Годунова второго порядка аппроксимации по пространству и времени. Более подробное описание математической модели и численного метода представлено в работах [1, 3].

4. Результаты расчетного исследования течения

В результате расчетов получены кинематические характеристики пространственного потока в спиральной камере гидромашин в турбинном режиме. На рис. 1 приведено распределение абсолютной скорости в горизонтальной плоскости, проходящей через середину колонн статора, при приведенном расходе $Q_I'=314,3$ л/с. Как видно из рисунка, наличие колонн статора оказывает существенное влияние на характер течения на выходе из СК.

С целью качественной и количественной оценки расчетных характеристик потока было проведено их сравнение с результатами зондовых замеров на гидродинамическом стенде [4]. Экспериментальные исследования пространственного течения жидкости в геометрически подобной спиральной камере проведено в ИПМаш НАН Украины на гидродинамическом стенде в модельном блоке обратимой гидромашин с диаметром РК $D_I=0,35$ м. Измерения параметров потока выполнены пятиканальными шаровыми зондами с диаметром шарика 8 мм в меридиональных сечениях спирали с углом $\varphi_{сп}=0, 90, 180, 270, 315^\circ$. Испытательный напор на стенде в процессе зондовых замеров равнялся $H=4$ м. Зондирование потока проводилось в традиционной проточной части и в ПЧ без лопастных систем статора, НА и РК. Оценка точности измерений потока зондами показала, что относительная предельная погрешность в определении значений скорости V и её составляющих: окружной V_u , радиальной V_r и осевой V_z находится в пределах $1\pm 5\%$. Полученные значения скорости приводились к напору $H=1$ м.

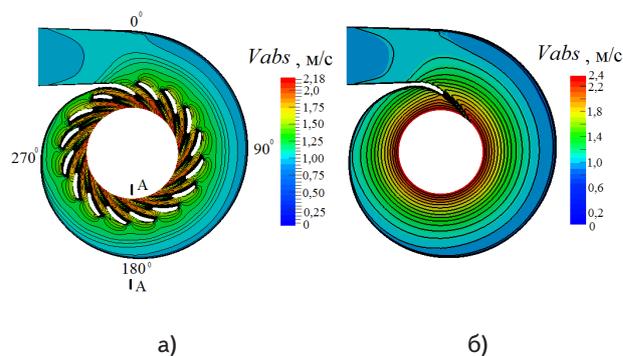


Рис. 1. Распределение абсолютной скорости в спиральной камере со статорными колоннами (а) и без них (б) в турбинном режиме при расходе $Q_I'=314,3$ л/с

Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик потока в СК в виде изолиний значений абсолютной скорости и ее составляющих в меридиональном сечении А-А с $\varphi_{сн}=180^\circ$ (рис. 1а) без колонн статора ($Q_1'=314,3$ л/с) представлены на рис. 2, а в традиционной ПЧ ($Q_1'=235$ л/с) на рис. 3. Анализ приведенных рисунков показывает хорошее качественное и количественное соответствие изолиний скоростей как при отсутствии статора, так и при его наличии. Структура потока в меридиональном сечении СК со статором и без него отличается незначительно, а значения составляющих абсолютной скорости пропорциональны расходу. Изолинии абсолютной скорости V_{abs} почти вертикальны, значения ее увеличиваются по мере приближения к выходу из СК. Распределение окружной скорости V_u аналогично распределению полной скорости. Ее значения составляют около 90 % от величины V_{abs} . Распределение радиальной V_r и осевой V_z составляющих, полученных численным путем, симметрично в отличие от экспериментальных данных потому, что расчетная область не учитывала поворот потока из радиального направления на осевое. Кроме того, зондовые замеры выявили в этой области спиральной камеры (угол охвата 180°) наличие вторичного течения в верхней части сечения. Расчетные же исследования показали наличие парного вихря в диапазоне угла охвата СК $\varphi_{сн}=45-150^\circ$.

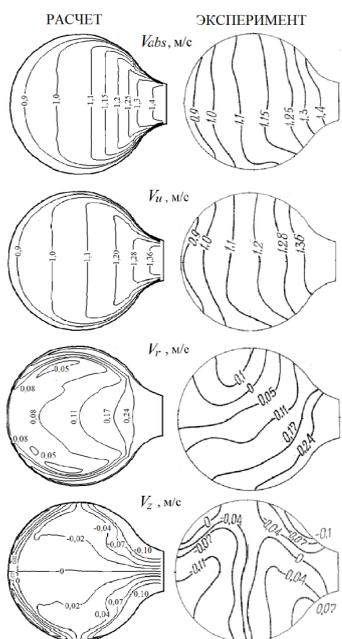


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные поля абсолютной скорости и её составляющих в сечении СК $\varphi_{сн}=180^\circ$ при отсутствии статорных колонн при расходе $Q_1'=314,3$ л/с

На рис. 4 приведено распределение расчетных и экспериментальных значений [4] абсолютной скорости и ее составляющих, а также угла спирали в сечении А-А с $\varphi_{сн}=180^\circ$ по высоте канала b перед входом в решетку статора при расходе $Q_1'=314$ л/с.

Из представленных на рисунке данных видно, что распределение экспериментальных и расчетных параметров носит одинаковый характер, имеет место и хорошее количественное соответствие, что позволяет

сделать вывод о возможности использования программного комплекса *FlowER-U* для разработки новых и совершенствования модернизируемых ПЧ гидромашин.

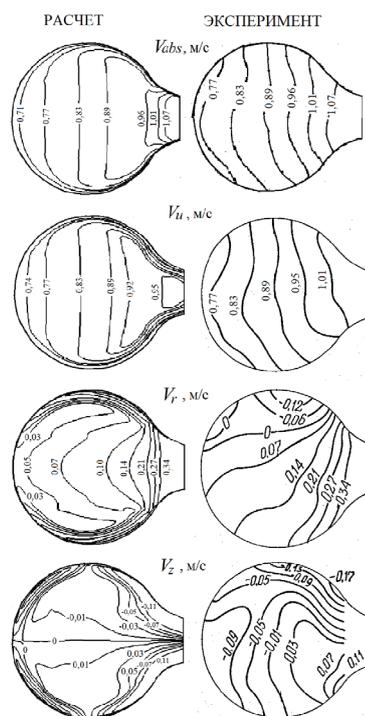


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные поля абсолютной скорости и её составляющих в сечении СК $\varphi_{сн}=180^\circ$ со статорными колоннами при расходе $Q_1'=235$ л/с

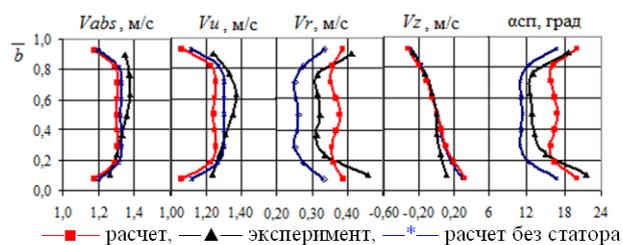


Рис. 4. Распределение абсолютной скорости, ее компонент и угла потока, формируемого спиральной камерой, по высоте канала

При проектировании проточной части гидромашин, включающей в себя лопастные системы статора, НА и РК, и расчета течения в ней необходимо достоверно знать граничные условия на входе: распределение компонент абсолютной скорости и угла, формируемого спиральной камерой $\alpha_{сн}$. На рис. 5 приведено распределение по высоте канала осредненных в окружном направлении расчетных параметров в сечении перед входом в статорные колонны, $R=0,283$ м при расходе $Q_1'=314$ л/с.

Из приведенного рисунка видно, что перед колоннами статора имеет место значительная неравномерность осредненных значений составляющих скорости и угла потока. В середине канала значение абсолютной

скорости V_{abs} на 10, а V_u на 15 % выше, чем у статорных колец как при наличии статорных колонн, так и без них. Наибольшее значение радиальной составляющей V_r наблюдается в центре канала, при удалении от середины она снижается на 12 %, а при приближении к кольцам вновь возрастает на 2-3 %. Характер распределения угла потока $\alpha_{сп}$ аналогичен распределению V_r : максимальное значение в середине канала, при удалении значение угла падает на 10-12 %, а ближе к кольцам возрастает до значений, близких к максимальному. Таким образом, статор, являющийся плоской круговой решеткой, обтекается с переменным по высоте колонны углом атаки, что приводит к дополнительным потерям энергии. Из рис. 5 также видно, что значения всех параметров, в большей мере радиальной составляющей скорости V_r и угла потока $\alpha_{сп}$, в расчетной области со статором и без него существенно отличаются: разность V_r составляет примерно 25 %, а $\alpha_{сп}$ – свыше 4°. Из этого следует, что расчет течения в спиральной камере без учета статорных колонн не позволяет достоверно определить параметры потока и обоснованно задать граничные условия на входе для проектирования лопаток НА и лопастей РК.

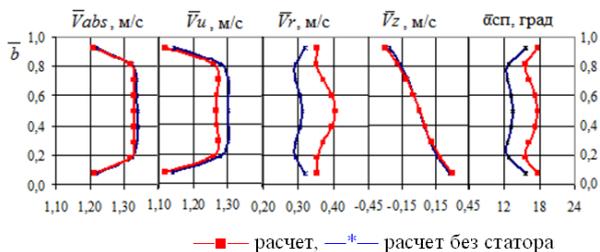


Рис. 5. Распределение по высоте расчетных осредненных характеристик потока в сечении с $R=0,283$ м с колоннами статора и без них

Изменение по охвату спирали ϕ осредненного по вы-

соте канала угла потока $\bar{\alpha}_{сп}^b$ и окружной скорости \bar{V}_u^b перед входом в статор показано на рис. 6. Угол потока, определенный по применяемой в настоящее время инженерной методике расчета СК, основанной на допущениях о потенциальном течении идеальной жидкости, не учитывает влияния решетки статора, имеет постоянное по углу охвата значение и в данной СК равен $10,6^\circ$. Численные исследования течения с учетом колонн статора и без них показывают значительную неравномерность распределения угла потока в окружном направлении (рис. 6). Наличие статора в ПЧ существенно уменьшает эту неравномерность. Осредненная окружная скорость в обеих ПЧ в диапазоне углов охвата $\phi=0-100^\circ$ плавно понижается, в диапазоне $\phi=100-200^\circ$ для традиционной ПЧ и $\phi=100-270^\circ$ для ПЧ без лопастных систем остается практически постоянной. При этом значения окружной скорости в традиционной ПЧ на 5-7 % ниже. На последнем участке

СК \bar{V}_u^b в ПЧ без статора снижается на 5 %, а со статором – возрастает на 12 %.

Одним из основных интегральных параметров потока, формируемого спиральной камерой, является осредненный по высоте канала и по углу охвата, угол потока $\bar{\alpha}_{сп}$, по которому выполняют профилирование колонн статора. Значение $\bar{\alpha}_{сп}$ в СК без колонн статора,

полученное в результате зондовых испытаний, равно $13,6^\circ$, по расчетным исследованиям – $13,5^\circ$, по расчетам с учетом колонн статора – $16,85^\circ$.

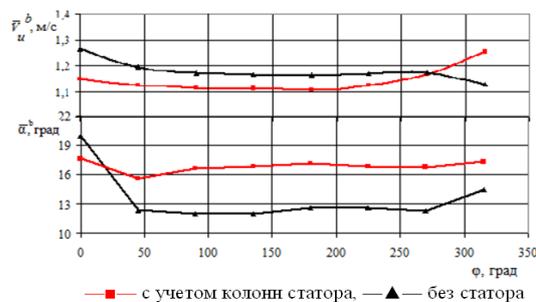


Рис. 6. Зависимость осредненных по высоте канала угла потока $\bar{\alpha}_{сп}^b$ и окружной скорости \bar{V}_u^b от угла охвата спирали ϕ

4. Заключение

Анализ результатов расчетного исследования пространственного вязкого течения жидкости в спиральной камере радиально-осевой обратной гидромашини по программе *FlowER-U* показывает хорошее соответствие с экспериментальными данными, позволяет выявить особенности течения и определить характер распределения скорости, ее составляющих и угла потока, создаваемого спиральной камерой перед решеткой статора, обеспечивая его рациональное проектирование. Показано, что параметры течения на выходе из СК со статором и без него существенно отличаются, и неучет влияния колонн может существенно повлиять на достоверность полученных результатов.

Литература

1. Русанов, А.В. Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости с использованием неявной квазимонотонной схемы Годунова повышенной точности [Текст] / А.В. Русанов, Д.Ю. Косьянов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №5. – С. 4–7.
2. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA J. – 1994. – 32, №8. – Р. 1598 – 1605.
3. Русанов, А.В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин [Текст] / А.В. Русанов, С.В. Ершов [Монография]. – Харьков: Ин-т пробл. машиностроен. НАН Украины, 2008. – 275 с.
4. Сухоребрий, П.Н. Исследование спиральной камеры, статора и направляющего аппарата радиально-осевой гидромашини средней быстроходности: Автореф. дисс. канд. техн. Наук [Текст] / П.Н. Сухоребрий // Харьковский политехнический институт.– Х., 1982. – 23 с.

Abstract

The article represents the results of the numerical study of the spatial flow of an incompressible viscous fluid in the spiral case of the reversible radial-axial hydromachine, designed for head $H=200$ m, in turbine mode. The spiral case with the angular coverage for $\varphi_{cn}=360^\circ$ had round meridian sections, calculated according to the law of constancy of the velocity moment $V_{\omega}r=\text{const}$.

The calculations were performed using the software package FlowER-U for the model with the working wheel diameter $D1=350$ mm at the head $H=1$ m. The studies were conducted for the numerical area taking into account or not the stator columns. The number of cells in the grid was about 1.2 million.

The numerical studies permitted to obtain the distribution of the absolute velocity and its components: the circuit, radial and axial velocities, and the angle of flow, created by a spiral case in typical sections. The analysis of the impact of the presence of the columns on characteristics of the stator flow was carried out. The comparison of the calculated data with the results of gages studies on hydrodynamic stand showed good quantitative and qualitative agreement.

Keywords: numerical simulation, viscous flow, spiral case, hydromachine

Подорожчання енергоресурсів викликало необхідність застосування альтернативних енергоносіїв, зокрема біогазу. Але для ефективного його застосування необхідне поглиблене очищення, це вимагає пошуку нових шляхів реалізації процесу. Одним з напрямків виділення метану з біогазу є його очищення селективними розчинниками з використанням первопорачії для виділення самого розчинника. Для пошуку розчинника та здійснення процесу необхідно дослідити розчинення газів в різних розчинниках

Ключові слова: очистка біогазу, первопорачія, селективний розчинник

Подорожание энергоресурсов вызвало необходимость применения альтернативных энергоносителей, в частности биогаза. Но для эффективного его применения необходима более тщательная очистка, это требует поиска новых путей реализации процесса. Одним из направлений выделения метана из биогаза является его очистка селективными растворителями с использованием первопорачии для выделения самого растворителя. Для поиска растворителя и осуществления процесса необходимо исследовать растворение газов в разных растворителях

Ключевые слова: очистка биогаза, первопорачия, селективный растворитель

УДК 66.061.38

МЕМБРАННЕ ОЧИЩЕННЯ БІОГАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕЛЕКТИВНОГО РОЗЧИННИКА

І. А. Буртна

Кандидат технічних наук*
Контактний тел.: 067-548-60-97

Л. І. Ружинська

Кандидат технічних наук*
Контактний тел.: 050-961-75-15

О. О. Гачечиладзе

Кандидат фізико-математичних наук
Директор

ДП «Грузино-український дім»
пер. Музейний, 10, м. Київ, Україна, 01001

М. В. Шафаренко

Інженер I категорії*

М. М. Мурашко*

Контактний тел.: 050-632-57-63
E-mail: x.mifon.x@gmail.com

*Кафедра біотехніки та інженерії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Розділення багатокomпонентної газової суміші, що містить метан, вимагає пошуку нових більш ефективних шляхів реалізації процесу, наприклад, комбінування різних, способів розділення. Пропонується до розгляду поєднання селективного розчинення метану в рідкому

поглиначі з наступним виділенням його за допомогою мембранних первопорачійних технологій.

Вибір ефективного селективного поглинача проводиться на основі порівняльного аналізу розчинності компонентів синтетичного газу на стані рівноваги між рідкою і газовою фазами.