

УДК 621.224

Є. С. КРУПА

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОТОКУ В ПІДВОДІ ОСЬОВОЇ ПОВОРОТНО-ЛОПАТЕВОЇ ГІДРОТУРБИНИ

Проведено чисельний експеримент, за допомогою програмного комплексу *OpenFOAM* для трьох модифікацій підводу осьової поворотної-лопатевої турбіни ПЛ20. В результаті проведення чисельного дослідження потоку отримано і проаналізовано поля швидкостей в характерних перетинах підводу гідротурбіни ПЛ20, епюри розподілу швидкостей вздовж перетинів колон статора, значення гідравлічних втрат енергії у підводі. На основі даного аналізу було вибрано варіант підводу з мінімальними втратами та найкращою картиною течії в проточній частині.

Ключові слова: гідротурбіна, проточна частина, спіральна камера, статор, втрати енергії, чисельне моделювання

Проведен численний експеримент, с помощью программного комплекса *OpenFOAM* для трех модификаций подвода осевой поворотной-лопастной турбины ПЛ20. В результате проведения численного исследования потока получено и проанализировано поля скоростей в характерных сечениях подвода гидротурбины ПЛ20, эпюры распределения скоростей вдоль сечений колонн статора, значения гидравлических потерь энергии в подводе. На основе данного анализа был выбран лучший вариант подвода с минимальными потерями и лучшей картиной течения в проточной части.

Ключевые слова: гидротурбина, проточная часть, спиральная камера, статор, потери энергии, численное моделирование

A numerical experiment was carried out using the *OpenFOAM* software package for three modifications of the approach of the Kaplan turbine PL20. As a result of the numerical investigation of the flow, the velocity fields were obtained and analyzed in the characteristic sections of the supply of the Kaplan turbine PL20, the velocity distribution diagrams along the sections of the stator columns, the value of the hydraulic losses of energy in the supply. Сумарні втрати в спіральній камері зі статором обчислювалися як різниця повної енергії на вході в спіраль і виході зі статора, поділена на напір. Based on this analysis, the best approach was chosen with minimal losses and the best flow pattern in the flow section.

Keywords: hydraulic turbine, flow part, spiral casing, stay vanes, energy loss, numerical modelling

Вступ. При створенні нової гідромашини, коли відповідні модельні характеристики відсутні, спрогнозувати її напір і ККД до її виготовлення в металі донедавна було вкрай важко. Визначити теоретичний напір, задавшись трикутниками швидкостей на вході і виході, дозволяє рівняння Ейлера. Для визначення кутів потоку в цих трикутниках було запропоновано безліч емпіричних формул для різних класів гідромашин (наприклад, поправка Стодоли–Майзеля).

При відсутності модельних характеристик спрогнозувати параметри, що видає гідромашина, можливо лише за результатами розрахунку картини течії рідини в середині її проточної частини (ПЧ) [1; 2; 3; 7]. Загальний випадок руху рідкого середовища описується рівняннями Нав'є–Стокса, проте їх рішення, зважаючи на їх складності, до недавнього часу було можливо лише з істотними спрощеннями.

У даній роботі для чисельного дослідження потоку в підводі (спіральна камера (СК) та статор) гідротурбіни ПЛ20 було використано програмний комплекс *OpenFOAM*.

Програмний комплекс *OpenFOAM* в даній час широко використовується для вирішення прикладних завдань гідрогазодинаміки [2].

Програмний комплекс *OpenFOAM* призначений для моделювання тривимірних течій рідини і газу в технічних і природних об'єктах, а також візуалізації цих течій методами комп'ютерної графіки.

Моделювані течії включають в себе стаціонарні та нестаціонарні, стискувані, слабостискувані і нестискувані потоки рідини і газу. Використання різних моделей турбулентності і адаптивної розрахункової сітки дозволяє моделювати складні

рухи рідини, вмикаючи течію з сильною закруткою, горінням, течії з вільною поверхнею.

Процес розрахунку течії рідини включає в себе наступні кроки, виконувани користувачем:

- створення області розрахунку ("геометрії" пристрою) в САПР і імпортування її в *OpenFOAM*;
- завдання математичної моделі;
- завдання граничних умов;
- створення розрахункової сітки;
- завдання параметрів методів розрахунку;
- проведення розрахунку (без участі користувача);

є) перегляд результатів розрахунку в графічній формі ("візуалізація" результатів розрахунків) та збереження даних у файли;

Об'єкт дослідження. Умови проведення розрахунків. В якості об'єкта дослідження було розглянуто підвід (СК з решіткою статора) осьової поворотної-лопатевої гідротурбіни ПЛ20.

Основні геометричні характеристики СК: симетричні трапецеїдальні меридіональні перетини; кут обхвату в плані $\varphi_{сп} = 210^\circ$; на вході встановлено опорний бичок, який розділяє потік на два рівних за площею канали. Статор складається з 12 колон, включаючи зуб спіралі.

Створення геометричної моделі підводу. В даній час існує цілий ряд програмних продуктів дозволяють ефективно виконати це завдання *SolidWorks*, *T-Flex*, *Unigraphics*, *AutocadMechanical Desktop*, *ProEngineer*, *Catia*, Компас 3D та ін. [1; 3; 4].

Розрахунок течії води в гідроагрегаті є завданням внутрішньої течії, тому в *OpenFOAM* достатньо імпортувати геометрію ПЧ. При цьому внутрішній об'єм підводу повинен бути представлений як твердотільна модель (рис. 1).

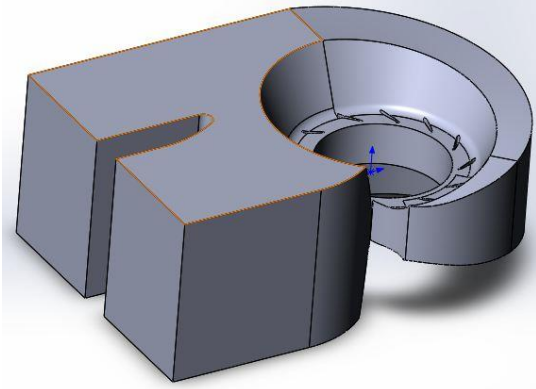


Рис. 1 – Твердотільна модель проточної частини підводу

Вибір математичної моделі та моделі турбулентності. Одним з головних етапів вирішення задачі є вибір моделі розрахунку.

На першому розрахунковому етапі середовище припускається однофазним нестискуваним в'язким, течія – турбулентна. Процес, що моделюється припускається ізотермічним. Критерієм турбулентності є число Рейнольдса.

Для математичного моделювання турбулентних течій в проточній частині використовуємо систему рівнянь нерозривності і Рейнольдса усередненого турбулентного руху:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u'_i u'_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \end{cases}$$

де $i, j = 1 \dots 3$ – сумування за однаковими індексами; x_1, x_2, x_3 – осі координат; u_1, u_2, u_3 – осереднені за часом значення швидкостей; u'_1, u'_2, u'_3 – пульсаційні складові швидкостей; f_i – виражає дію масових сил. Течія в обертювх робочих органах розглядається у відносній системі координат, при цьому член f_i в правій частині рівняння виражає дію відцентрових і коріолісових сил: $\vec{f}_i = -\rho(2\vec{\omega} \times \vec{u} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}))$, де ω – кутова швидкість обертання; \vec{r} – радіус-вектор (модуль якого дорівнює відстані від даної точки до осі обертання).

Для замикання представленої системи рівнянь використовуються різні моделі турбулентності.

В даній роботі була використана модель турбулентності «Стандартна k - ϵ модель».

У сучасних програмних продуктах широко використовується k - ϵ модель турбулентності, а також її модифікації. При використанні цієї моделі система рівнянь руху рідини доповнюється двома диференціальними рівняннями, що описують перенос відповідно кінетичної енергії турбулентності k і швидкості дисипації ϵ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \epsilon,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - \rho C_{\epsilon 2} \epsilon),$$

де $P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ – член, що виражає генерацію

енергії k ; $\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$, $\Gamma_\epsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$.

Параметри ϵ і μ визначаються наступним чином:

$$\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}.$$

Константи k - ϵ моделі, згідно роботи: $C_\mu = 0,09$; $C_{\epsilon 1} = 1,44$; $C_{\epsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$.

Задання граничних умов. Чисельні дослідження виконано для моделі з діаметром РК $D_1 = 1$ м при напорі $H = 1$ м, для оптимального режиму роботи гідротурбіни (згідно універсальної характеристики ПЛ 20/811-В-50).

На межах розрахункових областей задавалися наступні параметри:

- на вході – масова режимна витрата $Q'_t = 1160$ л/с;
- на стінці – умова прилипання (швидкість дорівнює нулю);
- на виході – статичний тиск $P = 101325$ Па.

Завдання вихідної розрахункової сітки. Одним з найважливіших етапів створення розрахункової моделі є побудова розрахункової сітки. Побудова розрахункової сітки – це процес розбиття розрахункової області на безліч окремих комірок. Комірки сітки являють собою багатогранники, зазвичай тетраедри, гексаедр, призми або піраміди.

Кромки цих комірок утворюють лінії розрахункової сітки, а точки, розташовані на крайках або в центрі комірок – вузли розрахункової сітки. В результаті чисельного рішення рівнянь математичної моделі саме у вузлах розрахункової сітки і визначаються шукані параметри течії [2].

Дискретизацію досліджуваної проточної частини підводу виконано за допомогою неструктурованої сітки з комірками тетраедральної форми з локальним згущенням біля кромки колон статора.

Загальне число елементів СК з колонами статора – 3,2 млн (рис. 2).

Для якісного описання пограничного шару на стінках області будувалися призматичні комірки.

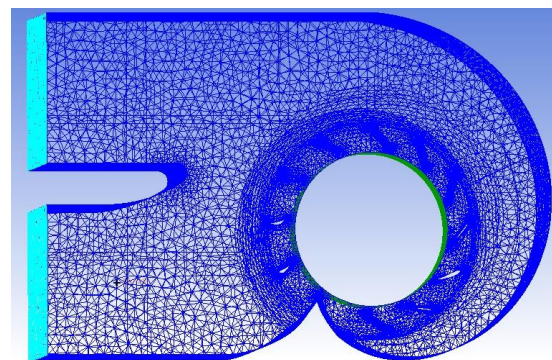


Рис. 2 – Розрахункова сітка моделі підводу

Чисельне дослідження потоку в підводі гідротурбіни ПЛ20 для різних модифікацій колон статора. В результаті проведення чисельного експерименту отримано і проаналізовано наступні дані для різних модифікацій колон статора:

- візуалізацію потоку (поля швидкостей) в характерних перетинах підводу гідротурбіни ПЛ20;
- епюри розподілу швидкостей вздовж перетинів колон статора;

– значення гідравлічних втрат енергії у підводі. Сумарні втрати в спіральній камері зі статором обчислювалися як різниця повної енергії на вході в спіраль і виході зі статора, поділена на напір.

На основі даного аналізу було вибрано найкращий варіант підводу з мінімальними втратами та найкращою картиною течії в проточній частині.

Модифікація 1.

На рис. 3 зображено геометрію моделі підводу з колонами статору однакової форми вздовж периметру статора. Слід одразу відзначити, що така форма колон статора у відкритій частині СК не використовується у гідротурбобудуванні [5; 6]. Чисельне дослідження течії при такій модифікації виконане для візуалізації відривних течій, що приводять до збільшення гідравлічних втрат та погіршення структури потоку перед лопатками направляючого апарату.

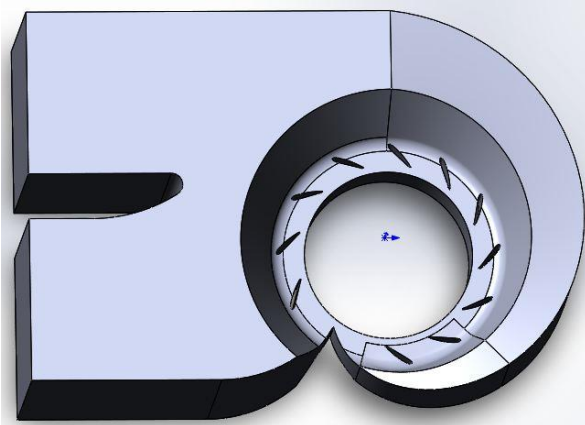


Рис. 3 – Геометрія підводу з однаковими колонами статору (модифікація 1)

На рис 4–7 приведено візуалізацію результатів розрахунку просторового потоку в пакеті *OpenFOAM* для модифікації 1.

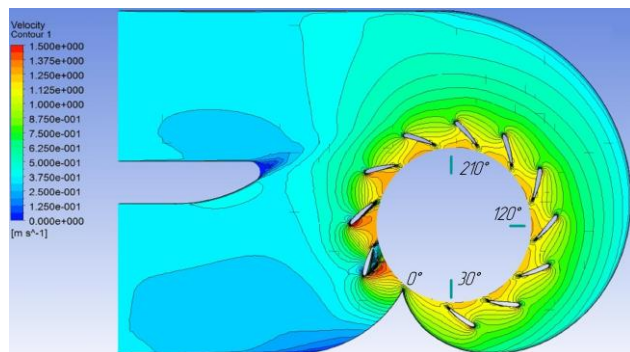


Рис. 4 – Розподіл абсолютної швидкості в середньому по висоті НА перетині (модифікація 1) на оптимальному режимі

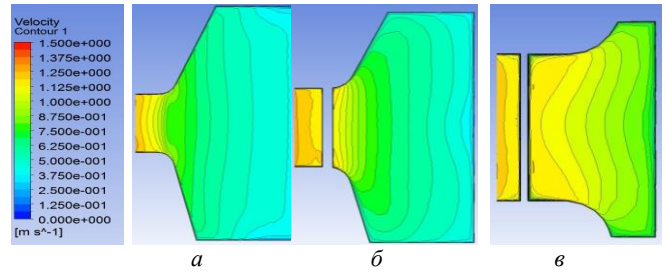


Рис. 5 – Поля абсолютної швидкості у меридіональних перетинах СК (модифікація 1) на оптимальному режимі: а – $\varphi_{cp} = 210^\circ$; б – $\varphi_{cp} = 120^\circ$; в – $\varphi_{cp} = 30^\circ$

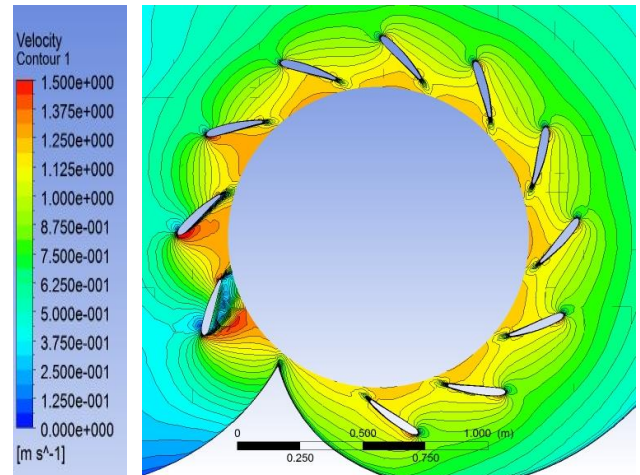


Рис. 6 – Обтікання статорних колон (модифікація 1) на оптимальному режимі

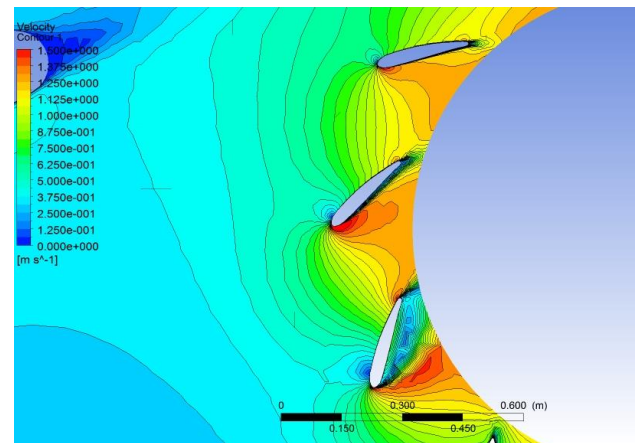


Рис. 7 – Обтікання трьох перших статорних колон після зуба СК (модифікація 1)

Проведемо аналіз отриманих результатів чисельного експерименту підводу з колонами статору однакової форми (модифікація 1).

На рис. 5 наведено ізолінії абсолютної швидкості меридіональних перетинів спіральної камери, відповідних кутам обхвату $\varphi_{cp} = 30^\circ$, $\varphi_{cp} = 120^\circ$ і $\varphi_{cp} = 210^\circ$. Значення абсолютної швидкості зростає при наближенні до колон статора. По висоті перетинів спостерігається рівномірний розподіл швидкості.

На рис. 4, 6, 7 приведено розподіл абсолютної швидкості в середньому по висоті направляючого апарату (НА) перетині (модифікація 1) на оптимальному режимі ($Q_f = 1160$ л/с). Як видно з цієї

візуалізації, обтікання семи колон, розташованих в спіральній частині камери є рівномірним. У цій області піки швидкостей на вході невеликі, і, отже, невеликі ударні втрати, гідродинамічний слід за колонами незначний. У відкритій частині камери, де встановлені чотири колони однакової форми, обтікання погіршується: спостерігаються значні відриви потоку на перших двох колонах після зубу спіралі, а за колонами присутній розвинений гідродинамічний слід.

Отже, при установці симетричних колон статора, СК не виконує своєї функції, а саме формування рівномірного осесиметричного підведення потоку на вході в решітку НА. Гідрравлічні втрати в підводі (модифікація 1) на оптимальному режимі по результатам розрахунку склали 1,5 %.

Модифікація 2.

При побудові другої модифікації було використано рекомендації [5; 6], які прийняті в гідротурбобудуванні при проектуванні колон статора.

Для забезпечення осесиметричного потоку на вході в направляючий апарат кут потоку δ на виході з колон повинен бути однаковим по всьому периметру статора. Кут $\delta_{вх}$ потоку на вході в колони статора різний в залежності від їх розміщення у відкритій частині камери. У відкритій частині камери кут δ спочатку зменшується до нуля, а потім приймає від'ємне значення біля зуба спіралі. Тому форму колон біля зуба виконують від'ємної кривизни. Форма колон в спіральній частині однакова [5].

На рис. 8 зображено геометрію моделі підводу з 12 колонами статора (включаючи зуб спіралі) – 4-ма колонами різної форми у відкритій частині спіральної камери та 7-ма колонами однакової форми в спіральній частині камери.

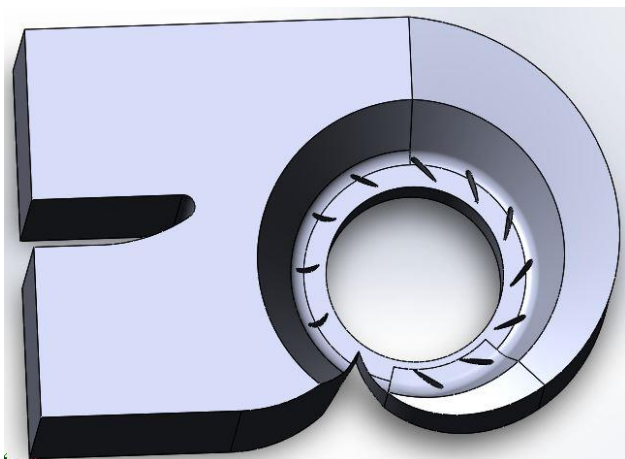


Рис. 8 – Геометрія підводу (модифікація 2)

На рис. 9–12 приведено візуалізацію потоку у підводі (модифікація 2) на оптимальному режимі ($Q'_l = 1160$ л/с).

На рис. 10 наведено ізолінії абсолютної швидкості меридіональних перетинах спіральної

камери, відповідних кутам обхвату $\varphi_{сп} = 30^\circ$, $\varphi_{сп} = 120^\circ$ і $\varphi_{сп} = 210^\circ$.

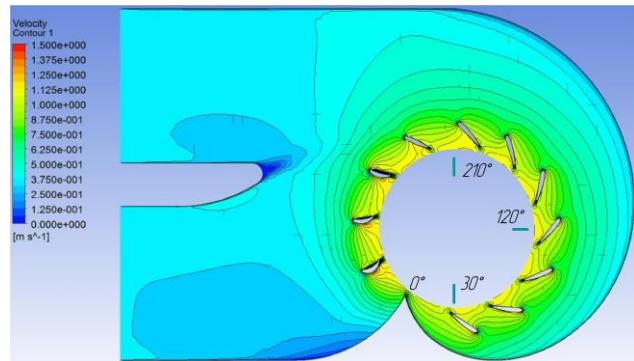


Рис. 9 – Розподіл абсолютної швидкості в середньому по висоті НА перетині (модифікація 2) на оптимальному режимі ($Q'_l = 1160$ л/с)

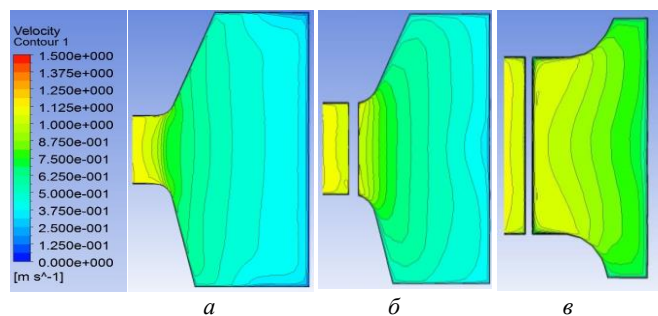


Рис. 10 – Поля абсолютної швидкості у меридіональних перетинах СК (модифікація 2) на оптимальному режимі ($Q'_l = 1160$ л/с):

a – $\varphi_{сп} = 210^\circ$; б – $\varphi_{сп} = 120^\circ$; в – $\varphi_{сп} = 30^\circ$

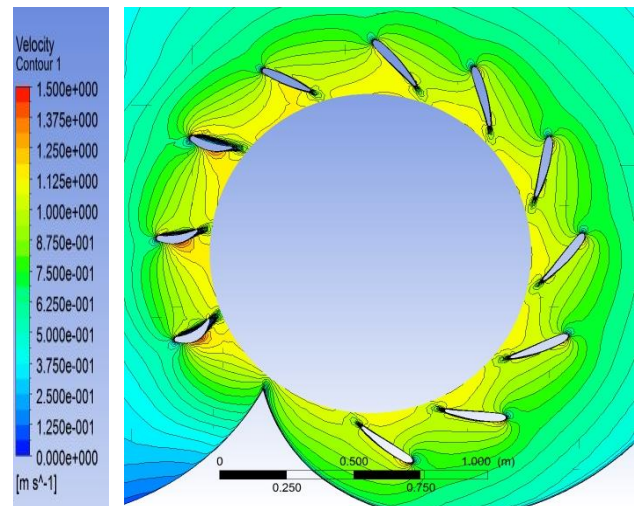


Рис. 11 – Обтікання статорних колон (модифікація 2) на оптимальному режимі ($Q'_l = 1160$ л/с)

Значення абсолютної швидкості зростає при наближенні до колон статора. По висоті перетинів спостерігається рівномірний розподіл швидкості. У порівнянні з модифікацією 1 абсолютна швидкість на виході з колон статора дещо менша.

На рис. 9, 11, 12 наведено розподіл абсолютної швидкості в середньому по висоті НА перетині на оптимальному режимі; як видно з цієї візуалізації,

картина течії у спіральній частині камери така ж як і в першій модифікації.

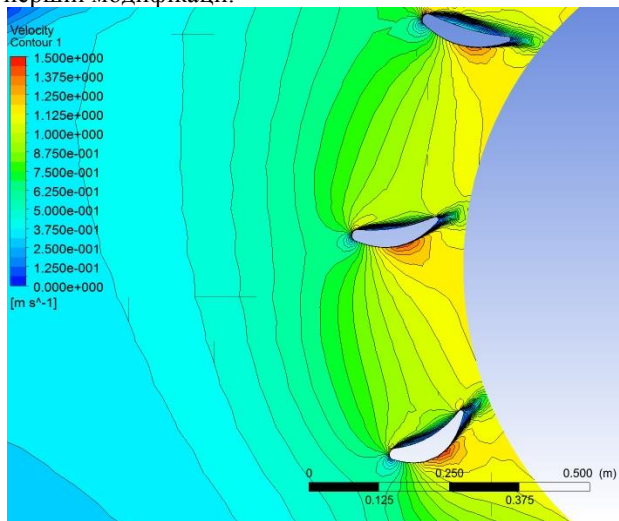


Рис. 12 – Обтікання трьох перших статорних колон після зуба СК (модифікація 2)

У відкритій частині камери, де встановлені чотири колони різної форми, спостерігаються невеликі відриви потоку на перших трьох колонах після зуба спіралі. Але в порівнянні з першою модифікацією течія по всьому периметру статора більш рівномірна, без значних відривів потоку.

Гідрравлічні втрати в підводі (модифікація 2) по результатам розрахунку склали 0,7 %.

Модифікація 3

Проаналізувавши результати чисельного дослідження потоку в підводі з колонами статора різної форми (модифікація 2) було зроблено висновок, що ця модифікація краща за першу, без значних відривів потоку, з меншими втратами в проточній частині. Але на перших трьох колонах після зуба у відкритій частині камери все таки присутні відриви потоку і значення швидкості потоку на спинці профілю збільшується. Тому у третій модифікації було дещо змінено форму цих трьох колон. З умовою збереження вихідного кута [5] δ було змінено кривизну профілю та кут $\delta_{вх}$.

На рис. 13 зображено геометрію моделі підводу з 12 колонами статора (включаючи зуб спіралі) з 4-ма колонами різної форми у відкритій частині спіральної камери (зміненої форми, у порівнянні з модифікацією 2, на основі аналізу результатів чисельного експерименту) та 7-ма колонами однакової форми в спіральній частині камери (модифікація 3).

На рис. 14–17 приведено візуалізацію потоку у підводі (модифікація 3) на оптимальному режимі ($Q_I' = 1160$ л/с).

Проведемо аналіз отриманих результатів чисельного експерименту підводу з колонами статора зміненої форми (модифікація 3).

Картина течії в меридіональних перетинах (рис. 15) схожа на попередню (модифікація 2;

рис. 10) як по значенням абсолютних швидкостей, так і по розподілу вздовж перетинів.

На рис. 14, 16, 17 наведено розподіл абсолютної швидкості в середньому по висоті НА перетині (модифікація 3) на оптимальному режимі; як видно з цієї візуалізації, обтікання семи колон, розташованих в спіральній частині камери є рівномірним.

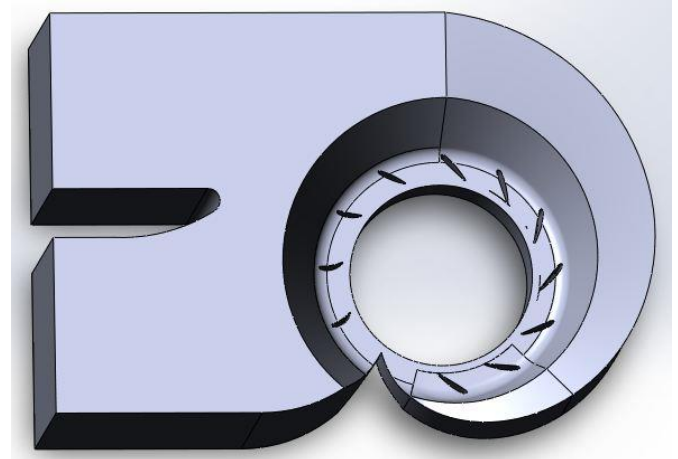


Рис. 13 – Геометрія підводу (модифікація 3)

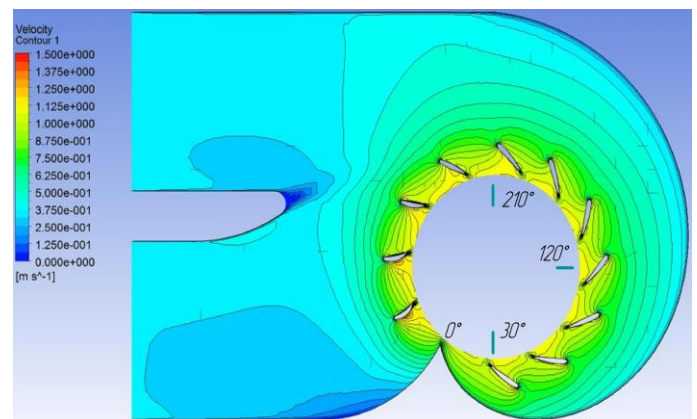


Рис. 14 – Розподіл абсолютної швидкості в середньому по висоті НА перетині (модифікація 3) на оптимальному режимі ($Q_I' = 1160$ л/с)

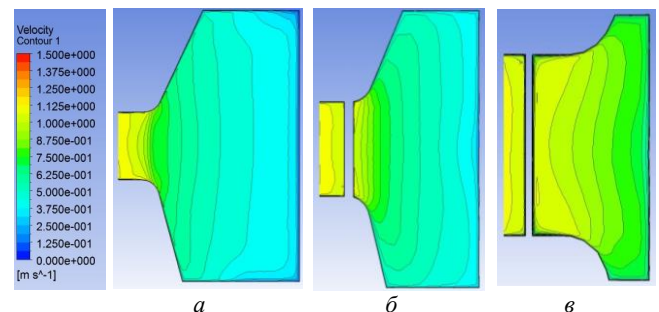


Рис. 15 – Поля абсолютної швидкості у меридіональних перетинах СК (модифікація 3) на оптимальному режимі ($Q_I' = 1160$ л/с):

$a - \varphi_{сп} = 210^\circ; б - \varphi_{сп} = 120^\circ; в - \varphi_{сп} = 30^\circ$

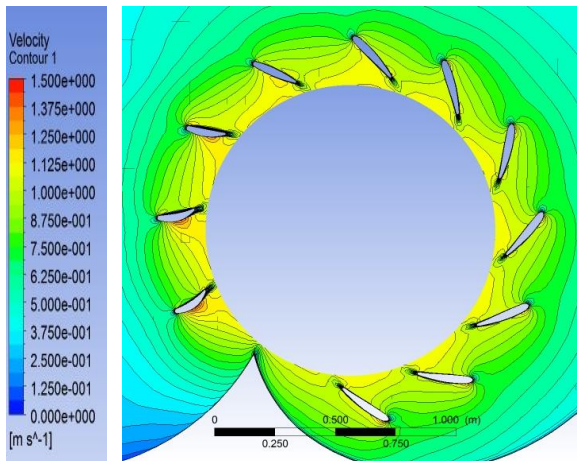


Рис. 16 – Обтікання статорних колон (модифікація 3) на оптимальному режимі

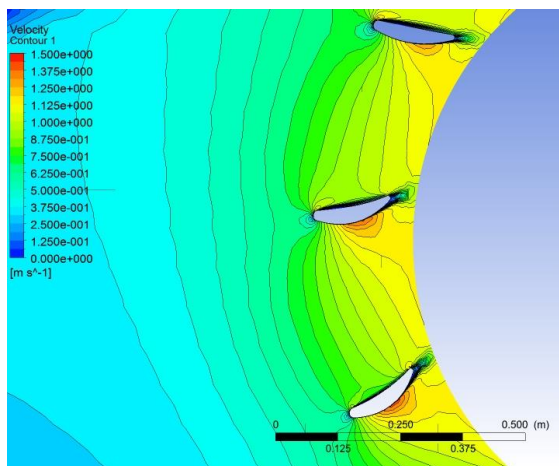


Рис. 17 – Обтікання трьох перших статорних колон після зуба СК (модифікація 3)

У відкритій частині камери, де встановлені чотири колони різної форми, геометрію яких було змінено у порівнянні з другою модифікацією, відриву потоку стали меншими і картина течії в проточній частині підводу дещо покращилась.

Гідравлічні втрати в підводі (модифікація 3) по результатам розрахунку склали 0,62 %.

Висновки. Отже, було проведено чисельний експеримент, за допомогою програмного комплексу *OpenFOAM* для трьох модифікацій підводу осьової поворотно-лопатевої турбіни ПЛ20.

Перша модифікація була виконана із заздалегідь не вірним для такого типу СК розміщенням і формою колон статора. В результаті розрахунку було виявлено суттєві зони відриву потоку, які негативно впливають на гідродинамічні характеристики підводу.

Друга модифікація колон була побудована згідно рекомендацій, прийнятих в гідротурбобудуванні, з колонами від'ємної кривизни та різної форми у відкритій частині СК. Результати розрахунку показали значне покращення картини течії та зменшення гідравлічних втрат у порівнянні з першою модифікацією.

В третій модифікації було змінено геометрію трьох колон, що дещо покращило картину течії та привело до зменшення гідравлічних втрат у підводі.

Прорахувавши три модифікації підводу, робимо висновок, що кращим варіантом є третя модифікація, як по картині течії, так і по мінімальним гідравлічним втратам у підводі.

Таким чином, програмний комплекс *OpenFOAM* можна використовувати для чисельного моделювання потоку у підводі гідротурбін, подальшої оптимізації геометрії колон статора та їх вплив на картину течії перед лопатками направляючого апарату.

Список літератури

1. Русанов А. В. Численное исследование течения жидкости в проточной части гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС / А. В. Русанов, А. В. Линник, П. Н. Сухоребрий, О. Н. Хорев, Д. Ю. Косьянов // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits.* – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 45. – С. 9–15.
2. Shudryk A. L. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid / A. L. Shudryk // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits.* – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 20. P.90–93.
3. Потетенко О. В. Численное исследование пространственного потока в проточной части капсульного гидроагрегата с помощью программного комплекса *FlowVision* / О. В. Потетенко, В. Э. Дранковский, Е. С. Крупа // *Вісник НТУ «ХПІ».* Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 14(988). – С. 72–78.
4. Rezvaya K. The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. / K. S. Rezvaya, E. S. Krupa, V. Drankovskiy, O. V. Potetenko, I. I. Tynyanova // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, № 7(1229), P.97–102.
5. Барлыт В. В. Гидравлические турбины / В. В. Барлыт. – Киев : Вища школа, 1977. – 360 с.
6. Ковалев Н. Л. Гидротурбины / Н. Л. Ковалев. – Л. : Машиностроение, 1971. – 584 с.
7. Барлыт В. В. Расчет и проектирование проточной части реактивных гидротурбин на основе численного моделирования рабочего процесса / В. В. Барлыт, К. А. Миронов, А. В. Власенко, Л. К. Яковлева // *Учебное пособие.* Харьков : НТУ «ХПІ», 2008. – 215 с.

References (transliterated)

1. Rusanov, A. V., et al. "Chyslennoe yssledovanye techenyya zhydkosty v protochnoy chasty hydroturbyny PL20 Kremenchuhs'koy HES." *Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydrounits.* No. 45 (1154). Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. 9–15. Print.
2. Shudryk, A. L. "Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid." *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits.* No. 20 (1192). Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. 90–93. Print.
3. Potetenko, O. V., et al. "Chyslennoe yssledovanye prostranstvennoho potoka v protochnoy chasty kapsul'noho hydroahrehata s pomoshch'yu prohrammnoho kompleksa FlowVision." *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya.* No. 14(988). Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 72–78. Print.
4. Rezvaya, K., et al. "The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine." *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* No. 7 (1229). Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. 97–102. Print.
5. Barlyt, V. V. *Hydravlycheskye turbiny.* Kiyiv: Vyshcha shkola, 1977. Print.
6. Kovalev, N. L. *Hydroturbinyi.* Leningrad: Mashynostroeny, 1971. Print.
7. Barlyt, V. V., et al. *Raschet y proektyrovanye protochnoy chasty reaktivnykh hydroturbyn na osnove chyslennoho modelyrovannya rabocheho protsessu.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2008. Print.

Надійшла (received) 02.10.2017

Чисельне моделювання просторового потоку в підводі осьової поворотно-лопатевої гідротурбіни / Є. С. Крупа // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 42 (1264). – С. 77–83. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2411-3441.

Численное моделирование пространственного потока в подводе осевой поворотной лопастной гидротурбины / Е. С. Крупа // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 42 (1264). – С. 77–83. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2411-3441.

Numerical simulation of the spatial flow in the approach of the Kaplan turbine/ E. S. Krupa // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 42 (1264). – P. 77–83. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2411-3441.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Крупа Євгеній Сергійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (057) 707-66-46; e-mail: zhekr@ukr.net.

Крупа Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Гидравлические машины»; тел.: (057) 707-66-46; e-mail: zhekr@ukr.net.

Krupa Evgeniy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, tel.: (057) 707-66-46, e-mail: zhekr@ukr.net.