

ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА РАБОТАТА НА ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛНА ТУРБИНА

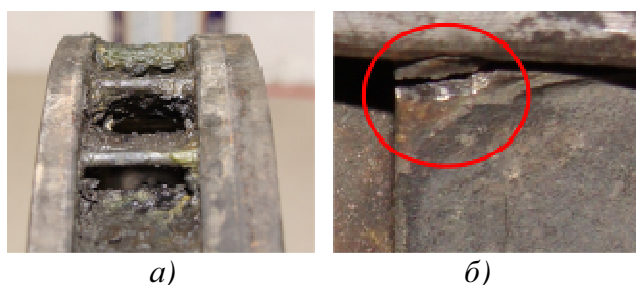
Анастас Янгъзов

Abstract: CFD software as CFX helps the designer to increase efficiency of ship auxiliary machinery, which is important direction to the future company development strategies. The paper describes the main stages, features and difficulties during the modeling process of a gas turbine. The main stages are as follows: geometry generation, fluid domain definition, mesh generation, CFX pre-processing, solving the system of equations using Finite Volume Method, CFX post-processing and at the end result analysis. In the paper are described water flow movement into gas turbine flow path

Key words: Gas turbine efficiency, Numerical modeling, CFD, ANSYS CFX

1. Въведение

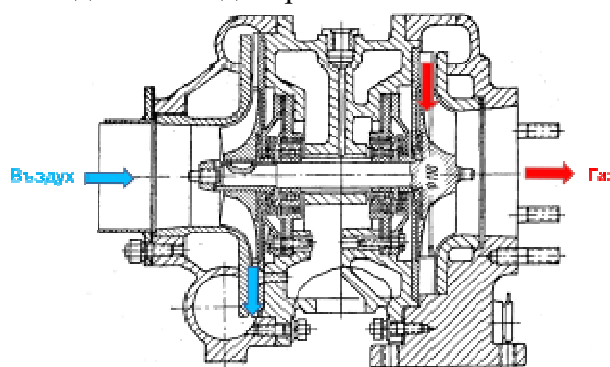
В корабните двигатели с ниска честота на въртене и големи диаметри на цилиндрите средното ефективно налягане достига или надвишава 10-12bar при цилиндрова мощност примерно 3000-4000kW. При четиритактовите дизелови двигатели ефективното налягане достига 15-18bar вследствие прилагането на високонапорни системи за принудително пълнене. Турбокомпресорите, снабдяващи двигателя с въздух, са единна част от двигателя с вътрешно горене. Тяхната ефективност и надеждност в голяма степен определят технико-икономическите показатели и надеждната работа на цялата енергетична уредба [1].



Фиг. 1. Отлагания (а) и пукнатина (б) в лопатката на направляващия апарат

На фиг.1,а е показана снимка, на която се виждат отлагания по стените на направляващ апарат на центроостремителна турбина на дизелгенератор. Причината е тежкото гориво, което изгаря в цилиндрите на дизеловия двигател. Отлаганията водят до

намаляване на проходната площ на гърловината. Абсолютната скорост на изтичане на димните газове се увеличава, деформира се скоростният триъгълник и като резултат потокът постъпва с ъгъл на атака в работното колело. Наблюдава се откъсване от стената на лопатката, загубите нарастват и намалява КПД на газовата турбина. На фиг.1,б е представена снимка с пукнатина в околност на изходящия ръб на направляващия апарат. Софтуерният продукт ANSYS съдържа модули, с помощта на които може да се открият зони от турбокомпресорния агрегат с повишени напрежения. Подобен вид изследване и моделиране имат отношение към



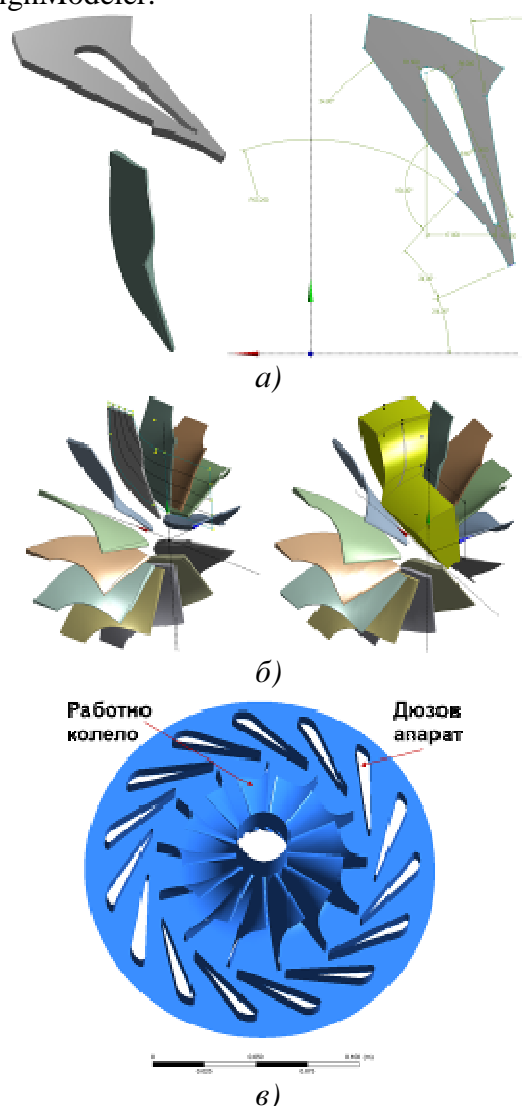
Фиг. 2. Турбокомпресорен агрегат ТКР-11

експлоатацията на съоръжението. За да се направи изчисление на термонапрегнатото състояние на агрегата е необходимо да се определи температурното поле и коефициентите на конвективен топлообмен за канала през който изтича газа. Температурата

на последния намалява т.к в газовата турбина протича процес на разширение. В настоящия доклад се разглеждат етапите на построяване на центростремителна турбина, която е част от агрегата ТКР-11 (фиг.2). Авторът се концентрира само върху флуидната задача.

2. Формиране на геометричната форма на направляващия апарат, лопатките на работното колело и отделяне на флуидната област

Построяването на геометричния модел на газовата турбина се извършва в модула DesignModeler.



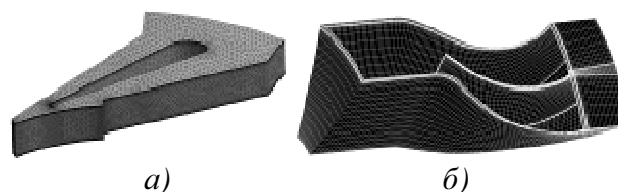
Фиг. 3. Построяване на геометричния модел

В този модул на ANSYS се построява равнинен чертеж на направляващия апарат. Използват се данни за съществуващия агрегат ТКР-11. Диаметърът на работното колело е

103mm, диаметърът на изхода на направляващия апарат е 110mm (фиг.3,а). При построяването на работните лопатки се дефинира меридианна равнина (фиг.3,б), отчита се радиалната хлабина в периферията, както и входящият и изходящият “метален” ъгъл β . След това трябва да се отдели “металната” част и да остане само флуидната (фиг.3,б). Резултат е моделът, представен на фиг.3,в (показани са само стените).

3. Формиране на мрежите на флуидните области

Мрежите на флуидните области се генерират в модул Meshing. При флуидната област на направляващия апарат се използва неструктурирана мрежа, а за въртящата се флуидна област-структурирана (фиг.4). Преди замрежването се задават имена на всяка равнина и повърхнина от модела.



Фиг. 4. Мрежа на флуидната област на направляващия апарат (а) и на работния лопатъчен канал (б)

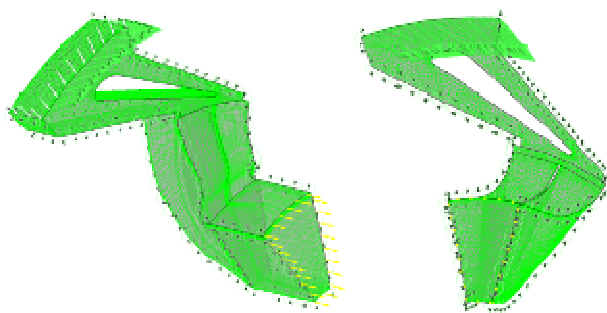
Неструктурираната мрежа на направляващия апарат се състои от 43894 възела и 147087 елемента (фиг.4,а), от които 108887 са тетраедри и 38200-призми, на въртящата се флуидна област 136486 възела и 124580 елемента (фиг.4,б), от които 124580 са шестостени. При формиране на мрежата както на неподвижната флуидна област, така и на въртящата се трябва да се следи да няма отрицателни обеми, силно разтеглени елементи или такива с много големи или малки ъгли. Точните стойности и изисквания са указани в инструкцията [2]. Има особеност при генерирането на мрежа в околност на стените. За да функционира адекватно SST турбулентният модел е

необходимо в О-мрежата да има повече от 10 елемента с оглед осигуряване на висока резолюция в областта на граничния слой. При формиране на мрежата на работното колело в

хлабината в периферията е добре да се дефинират повече от четири елемента, за да се развие и опише вторичното течение (фиг.8).

4. Дефиниране на работно тяло, задаване на гранични условия

След замрежването на неподвижната и въртяща се област на газовата турбина се стартира модула CFX-Pre. В него се внасят двете флуидни области. Турбулентният модел е SST (Shear Stress Transport). Той се прилага от множество специалисти в областта на турбомашиностроенето. Турбулентният модел е двуслоен и е валиден за пресмятането на параметрите на течението в цялата разглеждана област, като заедно с това се поставя условието за повишена резолюция на мрежата в областта на граничния слой със задействане на Automatic wall function. При използването на SST турбулентен модел с автоматична пристенна функция се отстранява влиянието на мрежата върху получените резултати. Моделира се работно тяло идеален газ въздух. Ъгловата скорост е 6702rad/s. Задават се граничните условия: на входа-налягане по пълни параметри 0.232MPa, температура по пълни параметри 1025K; на изхода-налягане 0.13MPa.



Фиг. 5. Задаване на гранични условия

По повърхнината на входа се задава турбулентна интензивност 5%. Съгласно инструкцията за работа със софтуерния продукт, модул CFX-Pre трябва да се избере типа интерфейс между въртящата и неподвижната област. В случая е избран Stage интерфейс (фиг.5).

Както за неподвижната флуидна област, така и за въртящата се дефинират

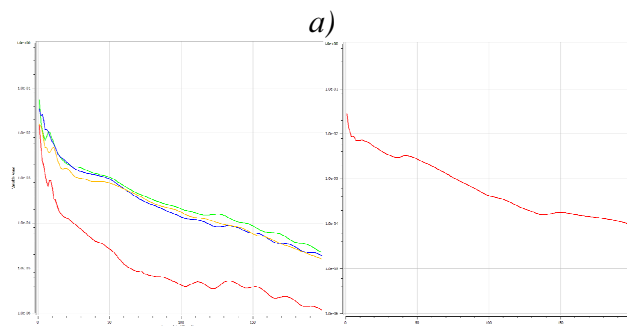
периодични повърхнини, които позволяват да се моделира само един канал и изменението на параметрите на потока при обтичането да се повтарят от канал в канал в окръжно направление. Това е ососиметрична постановка, характерна за турбомашините. Следва задаване на параметрите на изчислителния процес в модул CFX-Solver. Системата уравнения се пресмята чрез метод на крайния обем. В модула CFX-Pre се задават настройки на изчислителя (Solver). Схемата е High Resolution, брой итерации 200, критерий за сходимост 1.10^{-4} . Генерира се дефиниционен файл, който се прехвърля в изчислителя на CFX-Solver.

5. Пресмятане

В хода на пресмятане се следи за сходимостта на уравненията на непрекъснатостта, на импулса, също така уравненията на турбулентния модел SST-уравнение на турбулентната кинетична енергия, уравнение на турбулентната вихрова честота и уравнение за пристенния мащаб.

OUTER LOOP ITERATION = 18 CPU SECONDS = 1.718E+02

| Equation | Data | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
|----------------|------|---------|---------|-----------------|
| U-Mom | 0.98 | 2.4E-08 | 8.5E-02 | 2.2E-08 OK |
| V-Mom | 0.98 | 2.0E-08 | 2.0E-01 | 2.2E-08 OK |
| W-Mom | 1.02 | 1.6E-08 | 6.1E-02 | 6.5E-08 OK |
| P-Mass | 0.94 | 1.4E-06 | 5.0E-03 | 14.7 2.7E-02 OK |
| H-Energy | 0.95 | 5.8E-03 | 1.7E-01 | 5.8 3.1E-02 OK |
| K-TurbKE | 0.92 | 3.3E-03 | 1.2E-01 | 5.8 4.0E-02 OK |
| Omega-TurbFreq | 0.92 | 1.2E-08 | 8.7E-02 | 18.0 1.2E-08 OK |



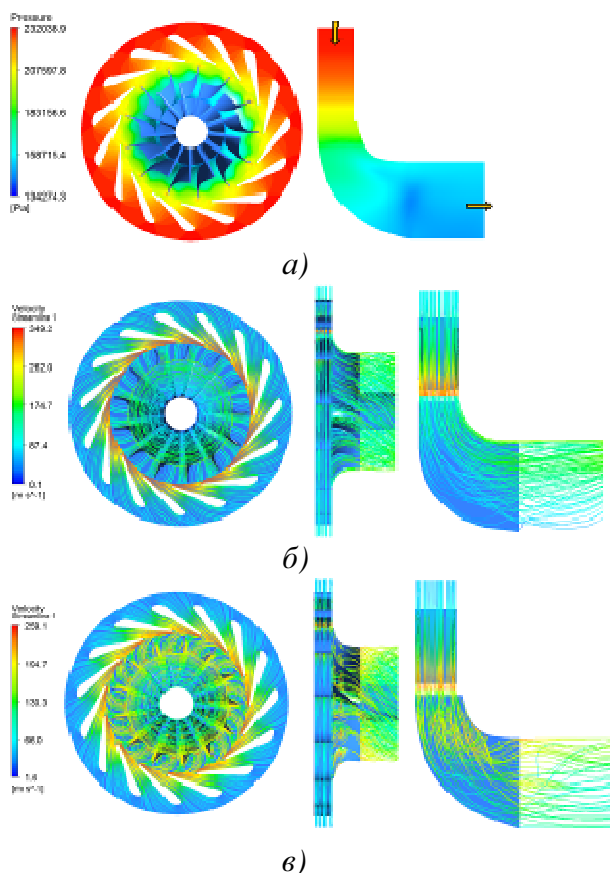
Фиг. 6. Сходимост на изчислителния процес

Модульт CFX-Solver не регистрира никакви забележки и изчислителният процес е сходящ (фиг.6). Времето за пресмятане на един

вариант на 64-битов компютър с процесор Intel Core i3 3.30GHz и RAM 8GB е 31min 29s.

6. Обработка на получените резултати

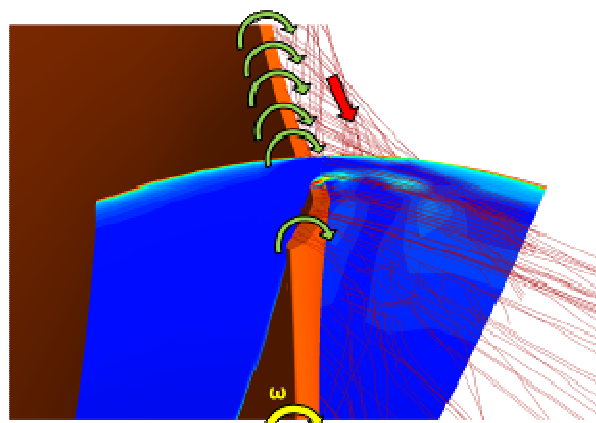
Последният етап е визуализация на получените резултати в модул CFX-Post. В последния се обработват огромно количество числени стойности за скорости-абсолютна и относителна, налягане, които са получени в модула CFX-Solver.



Фиг. 7. Изменение на налягането в проточната част (а), токови линии при номинален (б) и при частичен (в) режим

На фиг.7,а са показани контури на налягането в проточната част на газовата турбина. Със стрелки е указано движението на потока. Вижда се, че при движението на газа в междулопатъчните канали налягането намалява. Процесът на разширение започва в направляващия апарат и продължава в работното колело. В междулопатъчните канали на последното се извършва трансформация на кинетична енергия в механична. На фиг.7,б са показани

триизмерни токови линии и е включена визуализация на скоростта на потока. В неподвижния направляващ апарат потокът се ускорява и се показва изменението на абсолютната скорост. При въртящото се работно колело, токовите линии показват изменението на относителната скорост. В страничния изглед се забелязва ясно извиването на потока в окръжно направление. Това е пресмятане на номинален режим. Коефициентът на полезно действие е 81.3%. Той е пресметнат по времето на проектиране на агрегата ТКР-11. В средата на CFX, прилагайки осредняване по разхода се пресмята изоентропийният КПД по пълни параметри. Той е 76%. Причината за тази разлика е, че при пресмятането в ANSYS се моделира радиалната хлабина при върха на работната лопатка, освен това системата уравнения се затваря със турбулентен модел и са приложени изчислителни модели, които не са били реализирани през миналия век. На фиг.7,в са представени резултати от модела, но при смяна на граничните условия. Симулира се промяна в режима на работа на газовата турбина. Забелязва се ъгъл на атака при постъпването на потока в междулопатъчните канали. Това откъсване на газа от стените на работните лопатки е причина за намаляване на изоентропийния КПД по пълни параметри до 61%. Ясно се забелязва силното завихряне на газа в меридианната равнина от фиг.7,в.



Фиг. 8. Вторично течение в периферията на работната лопатка

На фиг.8 е представено течението в периферията в хлабината между работната лопатка и неподвижната стена на турбината.

С помощта на триизмерни токови линии се визуализира вторичното течение. То е добре известно в областта на турбомашиностроенето. Наблюдава се и в осовите турбинни стъпала. При това паразитно движение се губи част от потока, който се премества от зоната с по-високо налягане (корема на лопатката) към зоната с относително по-ниско (гърба на лопатката). В последната версия на ANSYS има възможност да се наблюдават зони с интензивно вихрообразуване. Хлабината при върха на работното колело е точно такава област. Тези инструменти в CFX-Post използват данните, получени в CFX-Solver и с тяхна помощ се изчисляват градиентите на скоростите по оси X, Y и Z. След това потребителят трябва да дефинира равнина, на фиг.8 тя е перпендикулярна на оста на въртене, и да използва инструмента Vortex Core Region: Vorticity. На фиг.8 е показана зона от периферията със силно извит поток. Това изостря вниманието на потребителя и има възможност да се предвидят конструктивни мерки за намаляване на загубите от вторични течения и загубите за работно тяло през хлабината.

7. Изводи и заключение

С помощта на изчислителата механика на флуидите могат да се открият скрити резерви за повишаване ефективността на преобразуване на енергията в проточната част на газовата турбина. Откриват се и възможности за повишаване КПД на агрегата. В турбокомпресорния агрегат присъства и центробежен компресор. Той също може да се моделира в средата на ANSYS. В бъдеще авторът възнамерява да моделира триизмерни лопатки с цел намаляване на загубите от вторични течения както в направляващия апарат, така и в работното колело. Представлява особен интерес прилагането на саблевидни, саблевидно-сърповидни и други лопатки със сложна форма.

[1] Йосифов Р, Лазаровски Н. Корабни турбомашини. Раздел II. Профили и решетки на топлинните турбомашини; Теория на реалното стъпало в турбомашините; Група стъпала и турбоагрегати; Турбокомпресорни агрегати. Варна, Малео-63, 2006.

[2] ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. ANSYS CFX Release 11.0, December 2006.

За контакти:

9010 Варна, ул. “Студентска”1
Технически университет -Варна

д-р инж. Анастас Янгъзов,
e-mail: anastasyangyozov@gmail.com
site: ansysturbomarine.com

Литература: