

# ИНЖЕНЕРНИ АНАЛИЗИ И ДОСТОВЕРНОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

## ENGINEERING ANALYSIS AND THEIR RESULTS CONFIDENCE

Георги Тодоров<sup>1</sup>, Константин Камберов<sup>1</sup>, Марио Семков<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>ТУ – София, Лаб. „CAD/CAM/CAE в индустрията“<sup>2</sup>)

*Материалът демонстрира възможни подходи за оценка на степента на достоверност на резултатите от инженерни анализи чрез виртуални прототипи посредством физически тестове. Представени са три подхода, които се различават основно прилагането на физическо прототипиране в различни етапа от процеса на виртуалното прототипиране. Основна цел е определяне на достоверността на резултатите от инженерните анализ, като тя се доказва както чрез верификация, така и чрез валидация. Подходите са илюстрирани чрез примери от три реализирани проекта, използвани като демонстрационни случаи, в областта на механика на флуидите и мултифизични (термофлуидни) процеси.*

*This study demonstrates possible approaches to assessing the confidentiality of engineering analysis results through virtual prototypes through physical tests. Three approaches are presented that examines application of physical prototyping at different stages of the virtual prototyping process. The main goal is to determine the results confidentiality of engineering analysis, as evidenced by both verification and validation. These approaches are illustrated by examples of three industrial projects used as demonstration cases in the field of CFD and multiphysical (thermoCFD) processes.*

**Key words:** APPROACH, VIRTUAL PROTOTYPING, PHYSICAL PROTOTYPING, CONFIDENTIALITY

### **Въведение**

Новото хилядолетие утвърди безспорно компютърните симулации на физически процеси като основен етап в процеса на развитие на нови продукти. Наред с приложението им в научните изследвания, при някои специфични проблеми, оценка на метеорологични и екологични прогнози, оценката на риска на подземните хранилища за ядрени отпадъци и редица други, те станаха конвенционален инструмент в индустриалните проекти.

Съвременните условия на развитие на нови продукти налагат изисквания за къси срокове за достигане на продукта до пазара, минимална себестойност, широк обхват на приложение, модулно изграждане за постигане на вариантност и други. Повечето от тези изисквания са противоречещи, за решаването на които способстват технологиите за виртуално прототипиране (ВП). Термини като "виртуално прототипиране" и "виртуално тестване" сега се използват широко в инженерната практика. [5].

Надеждността на изчислителните резултати е от голямо значение за инженерите и ръководителите, служители и тези, които са засегнати от решенията, които се основават на тези прогнози. Потребителите и разработчиците на инженерните анализи днес са изправени пред критичен въпрос: Възможно ли е да се оцени степента на достоверност на резултатите от виртуалното прототипиране?

Това проучване разглежда оценката на степента на доверие в резултатите от инженерните анализи, в частност – при физични процеси от механика на флуидите – Computational Fluid Dynamics (CFD). Практическите приложения на CFD анализите се увеличили значително през последните години, тъй като се считат за устойчива технология, която допринася значително за проектирането, анализа и разработването на инженерни системи, включващи флуидни потоци. Важен компонент при приложението на тази технология в процеса на разработване на продукти (Product Development Process - PDP) е нивото на степента на достоверност на резултатите от анализа. [3, 4] Тя се определя от две основни концепции:

- Устойчивост или колко правилно изчислителния модел описва истинската физика и какво е въздействието на неопределеността на модела (структурна или параметрична) върху резултатите от инженерния анализ?
  - Геометрична устойчивост (Дали геометричния модел достоверно отразява реалния обект?)
  - Неопределеност на изходното физическо състояние и граничните условия (Доколко добре са известни първоначалните / граничните условия?)
  - Структурна достоверност (Дали модела отразява коректно физичния процес?):

- Математични модели на турбулентност;  
 Модел на горене;
- Параметрична устойчивост (Колко точно са дефинирани параметрите на модела?): Уравнения на състоянието и заменящи модели; Степени на реакция и време на релаксация;
  - Изчислителна грешка или доколко точно са пресметнати резултатите, съобразно направените приближения по даден числен метод? [1, 2]

Това проучване се фокусира основно върху устойчивостта. Също така, се разглежда как може да се интегрира физическото моделиране и тестване, за да се увеличи достоверността на резултатите от виртуалното прототипиране.

#### Възможни подходи

Разгледани са възможните начини за приложение на физическото прототипиране за верификация и валидация на виртуалното прототипиране. Следващата фигура показва различните етапи от провеждане на инженерния анализ и мястото на физическите тестове.



**Фиг. 1** Етапи на изграждане на модел на провеждане на инженерен анализ и място на физическото прототипиране

Както е видно и от фигурата, възможни са три подхода при прилагане на физическите тестове в помощ на виртуалното прототипиране – според етапа на използването им:

- Предварителен – целта в случая е да се подпомогне определянето / валидирането на граничните условия – като тип и като параметри. Това е удобен подход за проверка

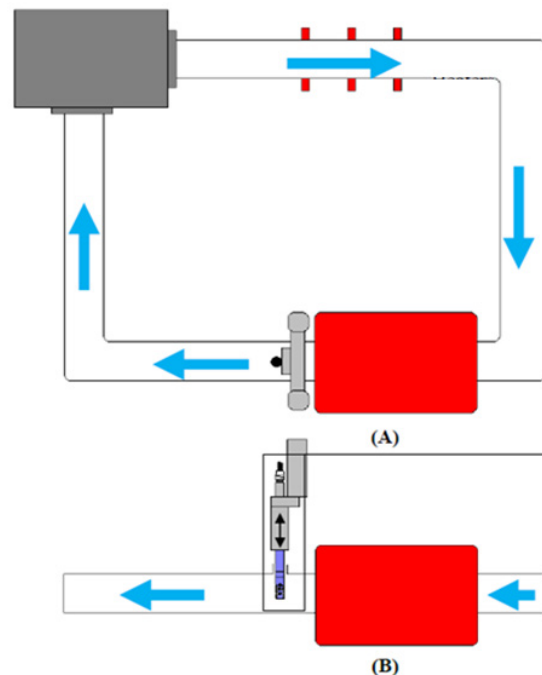
на приложените известни гранични условия, особено когато се използва хипотеза, която не обхваща напълно моделирания физически процес.

- Междинен – използва се основно за проверка на изградения симулационен модел посредством междинни измервания, много често върху частичен физически модел или мащабиран такъв.
- Окончателен – финален подход за валидиране на получените резултати. Този тип оценка не е много ефективна, тъй като обикновено е "контролна точка", където отрицателните резултати няма да дадат никаква ценна информация как да прецизираме симулационния модел.

Всеки от тези подходи се демонстрира по-нататък в изследването чрез три примера от инженерната практика.

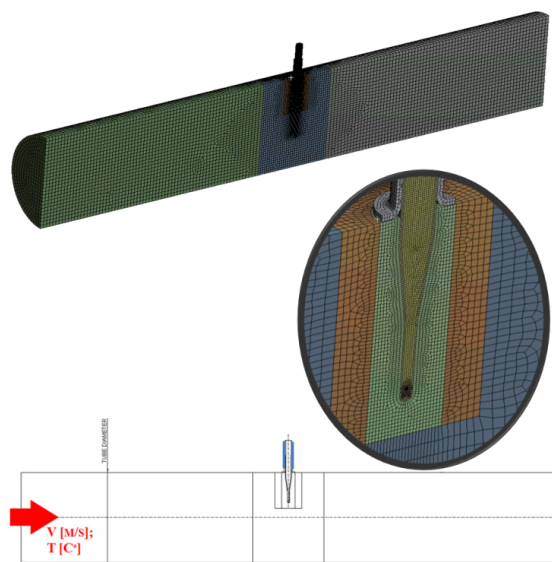
#### Демонстрация на предварителен подход

Конкретният пример е свързан с изследване на конструкцията на температурен сензор с цел подобряване на работните му параметри чрез мултифизичен инженерен анализ (термо-флуиден). Примера демонстрира подхода за предварително физическо тестване. Възпроизведения физичен процес се отнася до експериментална установка, при която сензорът се поставя в потока на топъл въздух в тръба. Последователността при провеждане на експеримента включва въвеждане на сензора в средата на загретия въздушен поток в тръбата за по-малко от секунда и стартиране на измерването на температурата.



**Фиг. 2** Експериментална установка: (А) – поглед отгоре на вентилатор, нагреватели и система за спускане на сензора; (В) – поглед от страни, с показана система за спускане на сензора

Целта на теста е да се определи времето за реакция (динамиката) на сензора чрез две основни характеристики - време за достигане на 63% ( $t_{63}$ ) и 90% ( $t_{90}$ ) на крайната установена температура – тази на въздушния поток. Изчислителния модел има за цел да възпроизведе този експеримент и да се използва допълнително за тестване на различни модификации на конструкцията, което би спестило време и средства за производство на физически прототипи.



**Фиг. 3** Изчислителен модел и зададени гранични условия за изчислителен модел на температурен сензор (въздушен поток и конвективен топлообмен по външните повърхнини на сензора)

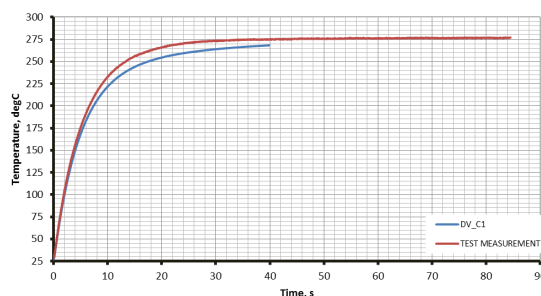
Основният проблем, при моделирането на този експеримент, е свързан с началните гранични условия. Изчислителният модел включва само върха на сензора, който е потопен във въздушния поток, докато останалата част, извън тръбата, не е представена. По този начин не може да се отчете коректно топлинния поток през частта, извън тръбата, както и не може да се възпроизведе самото „потопяне“ на сензора в тръбата. Независимо че въвеждането на сензора в зоната на нагряване става за сравнително кратко време, няма реална възможност да се отрази това, нито да се отчете обема околнен флуид, вкаран заедно в сензора в този ранен етап на нагряването, който се характеризира и с висока интензивност на процеса. Реално, няма удобен начин за възпроизвеждане на този процес и това е източник на недостовърност при неговото моделиране.

Граничните условия, приложени спрямо изчислителния модел, също са показани на фигура 3. Те включват конвективен топлообмен по външната за тръбата повърхност на сензора, представен като коефициент на конвекция към околна температура. Всъщност, няма достатъчно данни за този коефициент, който трябва да отрази топлоотвеждането извън тръбата.

Тук е уместно да се използва предварителен подход, за да се подпомогне определянето на параметрите на конвективния топлообмен. Извършва се физически тест, при

използване на експерименталната установка, като след това се изпълняват серия от анализи, вариращи конвекционните параметри, за да се достигне итеративно до техните коректни стойности. Това е една добра основа за по-нататъшни инженерни анализи върху различни конструктивни варианти, при които се използват определените вече параметри на конвективен топлообмен.

Едно сравнение между данните от тестовете на физическия прототип и виртуалният е показано на фигура 4, заедно с резултатите за изчислените времена за реакция на сензора. То показва добра кореспонденция, което показва адекватността на приложеният предварителен подход.

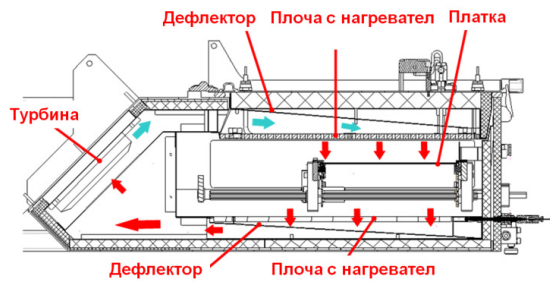


	T63	T90
TEST MEASUREMENTS	5.6	13.9
SIMULATION DATA	5.6	15

**Фиг. 4** Етапи на изграждане на модел на отреза, чрез типоразмерни конструкции и изрязване на сканираната геометрия

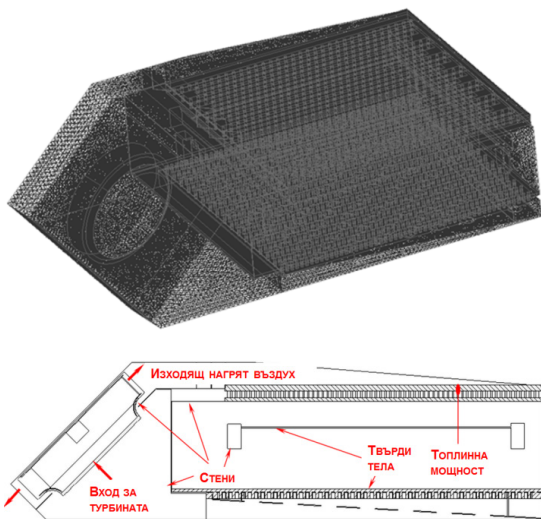
#### Демонстрация на междинен подход

Приведеният пример за приложение на междинния подход в практиката е относно конкретен конвекционен модул, който е важен компонент на производствено оборудване - фурна за термична обработка на компоненти от микроелектрониката. Това технологично оборудване е част от масово производство, използващо технология за SMD (Surface Mounted Device), при която се извършва спояване на изводите на компонентите към пистите на платката. Процеса налага високи изисквания към термичния профил на нагряване (основно към времетраене, скорост на нагряване и достигани температури в съответните етапи на процеса), който се осигурява именно от този технологичен модул. Освен изискванията за точно определена скорост на нагряване (динамика) и за допустими скорости на обдухване на нагряваните обекти (за да се избегне разместването им), се изисква и равномерност на нагряването. Тези високи изисквания са сериозен мотив за използване на технологиите за виртуално прототипиране, които позволяват оценяването в детайл на тези параметри. Крайната цел отново е анализ на термофлуидния процес и поведението на конструкцията с оглед на подобряване и – по възможност – достигане на оптимален режим на работа на модула за конвективен топлообмен. Схема на изследваната конструкция е показана принципно на фигура 5.



**Фиг. 5** Изследвана конструкция на конвективен модул, част от технологично оборудване за SMD монтаж

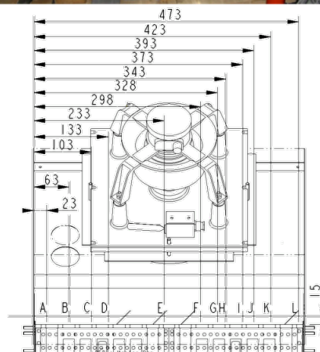
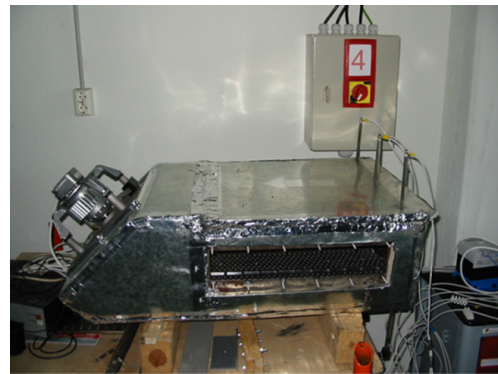
Разглежданият модел е добре дефиниран като геометрия, което позволява да се изгради точен изчислителен модел и да се зададат адекватни на моделирания физичен процес гранични условия. Предизвикателството в тази задача идва от няколко нелинейности, свързани с температурно зависимите свойства на материалите, които водят до силно нелинейно поведение на изследваната система и изискват дефинитивно необходимост от валидация на получените резултати. Използвания изчислителен модел е представен на фигура 6.



**Фиг. 6** Изчислителен модел и зададени гранични условия за изчислителен модел на конвективен модул (изходящ поток нагрят въздух, топлинна мощност в плочите и дебит за турбината)

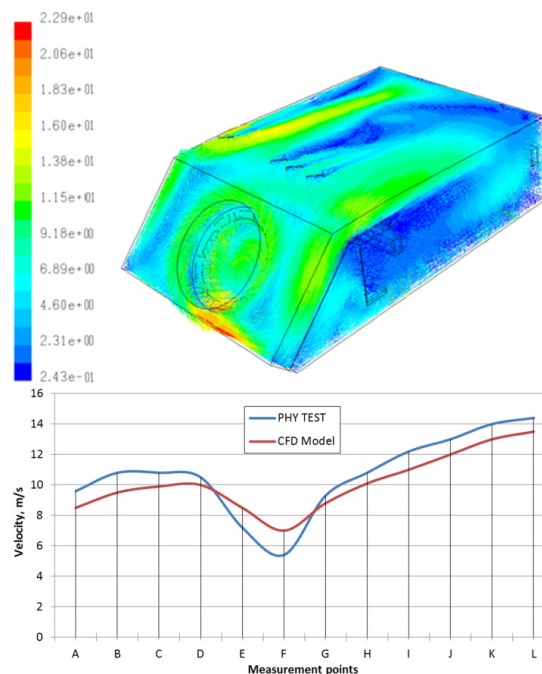
Съществуващата нелинейност в моделирания обект изисква междинна проверка на резултатите. Тази проверка се извършва чрез сравняване между данните за симулацията и данните от физическите изпитвания върху функционалния прототип на конвективния модул. Измерванията на скоростта на въздушния поток върху физически прототип се извършват с помощта на анемометри.

Произведенията за целта физически прототип и местата на разполагане на сондите за измерване на скорост на потока са показани на фигура 7.



**Фиг. 7** Физически прототип на изследваната система и позиции на разполагане на анемометри за измерване на скорост на въздушния поток

Резултатите от проведения инженерен анализ при използване на създадения виртуален прототип и съпоставката с измерванията върху физическия прототип са показани на фигура 8.



**Фиг. 8** Резултати от виртуален прототип и съпоставка с измерени стойности върху физически прототип

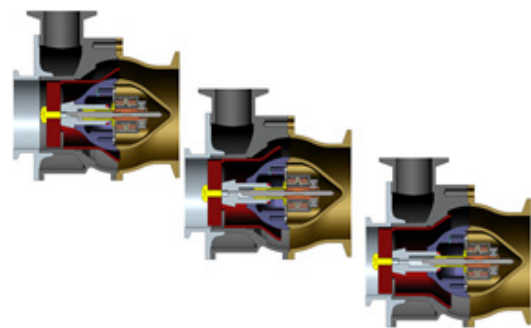
Ясно се вижда кореспонденцията между данните от теста на физическия прототип и тези от инженерния анализ на виртуалния прототип. В действителност, тази кореспонденция се постига чрез няколко итерации на стойностите за параметрите на модела на турбулентност, както и някои регулации на граничните условия (например характеристика на вентилатора).

Тези повторения се извършват на етап "Верификация на модела", както и дребни изменения на етап "Изчисления" (виж фигура 1) и е типичен пример за по-горе описания подход за увеличаване на достоверността на резултатите от инженерните анализи. Получените параметри за настройка на изчислителния модел се използват за по-нататъшни оптимизации на конструкцията. Крайният резултат се изпитва върху физическия прототип чрез директно измерване на основния работен параметър на изделието - температура на нагряване и разпределението ѝ върху повърхността на платката.

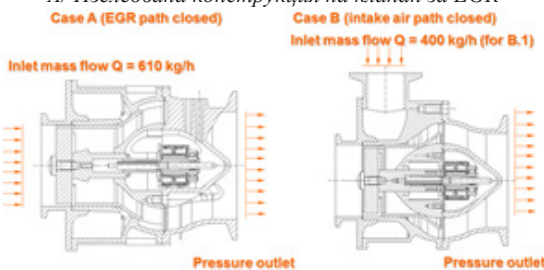
#### Демонстрация на окончателен подход

Последната демонстрация е по-популярна и широко използвана - за потвърждаване на получените резултати от инженерен анализ на процес от механика на флуидите чрез физически тестове. Самият инженерен анализ, свързан с механика на флуидите – CFD – е достатъчно предизвикателство, поради нелинейността на физичния процес (турбулентност, свиваемост, свързаност на основните величини като налягане и дебит чрез нелинейни функции). Именно тази нелинейност често пъти е причина за недостоверни резултати, подплатени с добре изглеждащи презентации.

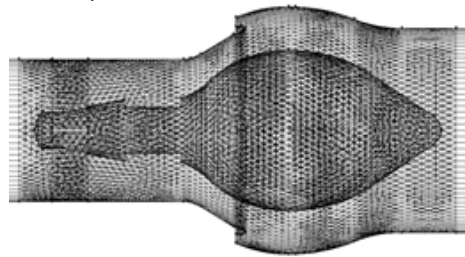
Примерът е от автомобилната промишленост - разпределителен клапан за система за рецикулация на емисиите (Exhaust Gas Recirculation – EGR). Този проект се основава изцяло на CFD симулации на разпределението на флуидния поток. Целта е да се определи пада на налягането (загуби) при различни положения на клапана. За целта е необходимо да се направят няколко изчислителни модела. Процеса не изследва температурни разпределения при смесването на свежия въздух и изгорелите газове, но това не намалява сложността на задачата поради нелинейния характер на физичния процес (CFD). Функционирането на системата (показани са три положения на клапана – изцяло пропускане на свеж въздух, смесването му с изгорели газове и изцяло пропускане на изгорели газове) е представено на фигура 9 А/ по-долу. За целите на настоящето изследване, са разгледани само два от изследваните режими на работа на изделието, които са показани като изчислителни модели на фигура 9 В/ и Г/. Ясно се вижда разликата в конфигурациите, изследваните флуидни области и създадените мрежи от елементи. Допълнително, на фигура 9 Б/ са обозначени граничните условия за изследваните два режима. Конкретно, зададените гранични условия са дебит на входа на системата и обозначен изход на изследвания модел (pressure outlet). Тези гранични условия напълно съответстват на геометричното разполагане на отделните компоненти от системата за разпределяне на рецикулацията на изгорелите газове, която е и обект на изследването.



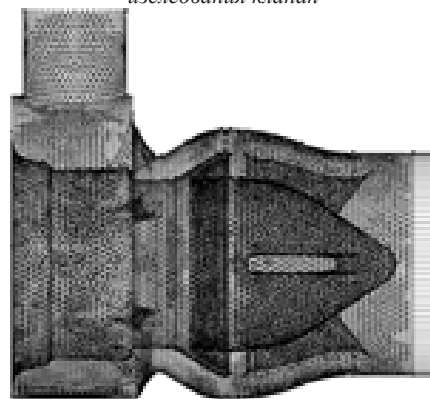
А/ Изследвана конструкция на клапан за EGR



Б/ Зададени гранични условия за два режима на работа на изследвания клапан



В/ Изчислителен модел за случай I на работа на изследвания клапан

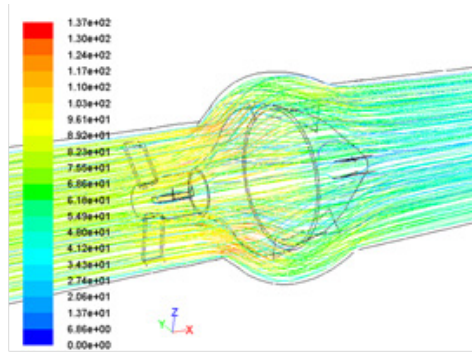


Г/ Изчислителен модел за случай II на работа на изследвания клапан

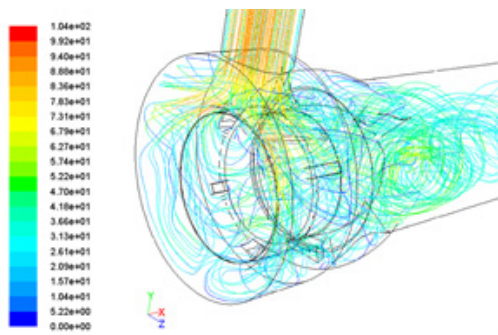
Фиг. 9 Изчислителен модел на клапан

Резултатите от проведените инженерни анализи за двата случая са показани примерно на фигура 10. Получените резултати от виртуалното прототипиране на физичен процес са потвърдени в края на проекта чрез тестване на физически прототипи. Резултатите са показани на фигура 11, където данните от измерванията са показани като криви, докато тези от виртуалните прототипи – с точки. Тази съпоставка е извършена чрез независими тестове, след изготвяне

на прототип чрез производствени технологии, и е истинско доказателство за степента на достоверност на извършените CFD симулации.

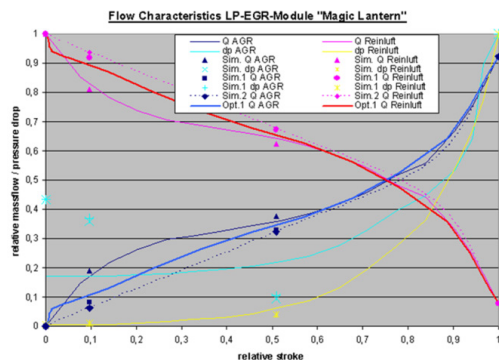


А/ Скорост на флуидното течение за случай I на работа на изследвания клапан



Б/ Скорост на флуидното течение за случай II на работа на изследвания клапан

Фиг. 10 Примерна извадка от резултатите от проведените инженерни анализи



Фиг. 10 Съпоставка на измерени върху физически прототип и пресметнати чрез инженерни анализи върху виртуален прототип параметри на изследвания клапан

#### Обобщение:

Това проучване демонстрира възможни подходи за оценка на степента на достоверност на резултатите от инженерни анализи чрез виртуални прототипи

посредством физически тестове. Самите подходи се различават основно по етапа от процеса на виртуално прототипиране, в който може да се приложи физическото прототипиране. Достоверността се доказва както чрез верификация (оценка на изградения изчислителен модел), така и чрез валидация (физическа оценка). Изследването се основава на предишен опит и се илюстрира чрез три промишлени проекта, използвани като демонстрационни случаи. Тези възможни подходи за анализ на физични процеси от областта на механика на флуидите и мултифизични (термофлуидни) процеси е добра основа за бъдеща практика на оценяване на достоверността, като се използват виртуални прототипи, подкрепени от физически тестове.

#### Благодарности

Работата е подкрепена от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на Оперативна програма "Наука и образование за интелигентен растеж 2014 - 2020" в рамките на проекта ЦВП "Национален център по мехатроника и чисти технологии" BG05M2OP001-1.001-0008-C01.

#### Литература:

1. Barth T.: A Brief Overview of Uncertainty Quantification and Error Estimation in Numerical Simulation, NASA Ames Research Center, NASA Report, 2011
2. Brinkgreve R.B.J.: Validating Numerical Modelling in Geotechnical Engineering, NAFEMS, 2013
3. Desai S. S.: Growth of CFD as an engineering tool for design and analysis of aerospace vehicles, Current Science, Vol. 77, No. 10 (25 November 1999), pp. 1283-1294
4. Hellen T.K., Becker A.A.: Finite Element Analysis for Engineers – A Primer, NAFEMS, 2013