

УДК 621.431.75

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

©2014 В.Н. Матвеев, Г.М. Попов, Е.С. Горячкин, Ю.Д. Смирнова

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

В современных газотурбинных двигателях (ГТД) остро стоит задача снижения массы. Один из путей решения этой задачи – применение компрессоров сверх- и трансзвуковой конфигурации, что позволяет достичь более высокой степени повышения давления в каждой ступени, чем при использовании дозвуковых компрессоров, и, тем самым, уменьшить число ступеней, необходимых для обеспечения требуемого значения степени повышения давления. В подобных компрессорах поток тормозится за счёт системы скачков уплотнений в сверхзвуковой части, а в дозвуковой – за счёт поворота потока в диффузорных каналах, образованных рабочими и направляющими лопатками. На современном этапе развития двигателестроительной отрасли проектирование новых и модернизация имеющихся компрессоров неразрывно связаны с использованием методов вычислительной газовой динамики. При этом необходимость моделирования системы скачков уплотнения накладывает высокие требования к построению расчётных сеток, в частности, выбора метода передачи параметров между вращающимися доменами рабочих колёс и неподвижными доменами направляющих аппаратов. В статье на примере трёхступенчатого компрессора низкого давления показано, что использование различных методов осреднения и передачи параметров между доменами может внести существенные различия в рассчитанные характеристики компрессора. Проанализированы три метода передачи параметров между доменами, используемые в программном комплексе NUMECA/FineTurbo. Проведена валидация рассчитанных характеристик компрессора с экспериментальными данными при различных частотах вращения ротора. Полученные данные показали адекватность применяемой численной модели рабочего процесса компрессора. На примере исследуемого компрессора показано, что учёт отбора воздуха приводит как к количественному, так и качественному изменению характеристики компрессора. Меняются степень повышения давления и запас газодинамической устойчивости, что может привести к несогласованной работе компрессора в составе двигателя. Сделан вывод о необходимости учёта моделирования отбора воздуха при расчёте сверхзвуковых компрессоров. Полученные результаты позволили расширить представление о рабочем процессе сверх- и трансзвуковых компрессоров и могут быть использованы при создании численных расчётных моделей компрессоров подобного типа.

*Компрессор низкого давления, гидродинамики, интерфейс, эксперимент.*

Компрессор – один из основных узлов ГТД, эффективность которого в значительной степени определяет эффективность всего двигателя [1]. Современные компрессоры должны обеспечивать максимально высокий коэффициент полезного действия (КПД), заданную величину повышения давления и обладать при этом достаточными запасами газодинамической устойчивости. Часто выполнение этих требования противоречит друг другу и оптимальным является компромиссное решение.

Поиск такого решения значительно облегчается благодаря использованию современных методов вычислительной газовой динамики (CFD – методы). Применение программных комплексов, основан-

ных на численных методах моделирования потока, позволяет конструктору с достаточной степенью точности определять характеристики компрессора ещё на стадии проектирования. Это, в конечном итоге, позволяет существенно снизить сроки и стоимость разработки нового изделия.

Объектом исследования в работе являлся компрессор низкого давления (КНД) стационарной газотурбиной установки. Компрессоры подобного типа характеризуются сложной пространственной картиной течения потока, наличием отрывов и вихрей, а также сверх- и трансзвуковой скоростью потока в первых ступенях.

Целью работы являлось:

- создание численной модели трёхступенчатого компрессора низкого давления;
- изучение влияния на протекание расчётных характеристик используемого типа интерфейса между вращающимися и не вращающимися доменами;
- изучение влияния на характеристики компрессора отбора воздуха.

Создание расчётной модели и расчёт осуществлялись в программном комплексе *NUMECA Fine/Turbo*.

При создании численной модели были приняты допущения:

- течение во всех лопаточных венцах (ЛВ) обладает свойством циклической симметрии;
- характер течения в КНД не является сугубо нестационарным, то есть расчёт можно выполнять в стационарной постановке;
- деформация лопаток от рабочих нагрузок моделировалась раскруткой лопаток на некоторый угол. Для втулочного сечения угол был принят равным нулю. В периферийном сечении угол был принят равным одному градусу. В остальных сечениях угол раскрутки определялся из условия линейного закона распределения по высоте лопатки;
- не учитывался теплообмен между стенками проточной части и потоком.

Геометрия расчётной области была построена на основе конструкторской документации и состояла из доменов входного направляющего аппарата, рабочих колёс, направляющих аппаратов (рис. 1).

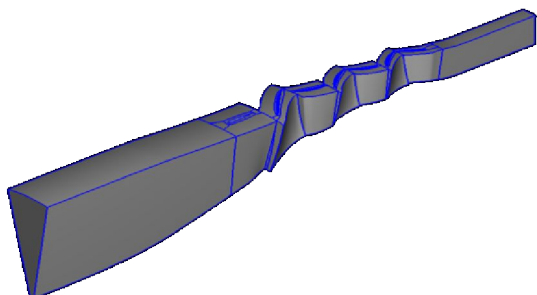


Рис. 1. Геометрия расчётной области

Созданная трёхмерная сетка конечных элементов расчётной модели КНД представлена на рис. 2. Суммарное количество элементов в сетке составило около

2,1 млн. Средний размер сетки для одного ЛВ составил 300 тысяч элементов. Величина минимальной скошенности в трёхмерной сетке составила 32 градуса. Среднее значение параметра *Aspect Ratio* составило примерно 2000.

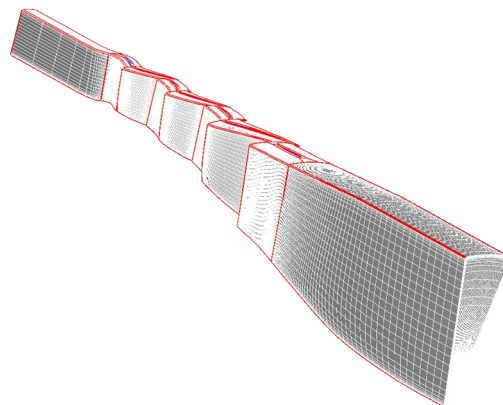


Рис. 2. Созданная конечно-элементная сетка численной модели КНД

При настройках расчётной модели в программном комплексе *NUMECA Fine/Turbo* в качестве рабочего тела использовался идеальный газ со свойствами сухого воздуха, переменными изобарной теплоёмкостью и вязкостью.

При расчётах использовалась модель турбулентности *k-ε (Low Re Yang-Shih)*.

В качестве граничных условий на входе в КНД задавалось значение полного давления  $p^* = 101,325$  кПа и полной температуры  $T^* = 288,15$  К, направление потока на входе было задано осевым.

На выходе из КНД задавалось статическое давление во втулочном сечении с учётом радиальной неравномерности потока.

В первых ступенях современных компрессоров низкого давления поток движется со сверх- и транзвуковыми скоростями. При этом возникает система скачков уплотнений. При положении системы скачков уплотнений, когда возможен её выход за пределы интерфейса, связывающего вращающиеся домены рабочих колёс и неподвижные домены направляющих аппаратов, могут возникнуть неточности при расчёте.

Для того, чтобы исключить влияние возможного отражения скачка уплотнения от интерфейса, связывающего домен пер-

вого рабочего колеса и входного направляющего аппарата, была проведена серия расчётов при частоте вращения доменов рабочих колёс 5000 об/мин с использованием различных типов интерфейсов:

*full non matching mixing plane* – интерфейс, осредняющий параметры потока в окружном направлении;

*non reflecting 1D* – интерфейс, не позволяющий волнам уплотнений отражаться;

*local conservative coupling* – интерфейс, осредняющий параметры потока по всем узлам в окружном направлении.

Рассчитанные с использованием различных типов интерфейсов характеристики КНД показаны на рис. 3. На графиках сплошной линией с маркерами в виде кругов показаны характеристики, рассчитанные с использованием интерфейса *full non matching mixing plane*; сплошными линиями с маркерами в виде треугольников показаны характеристики, рассчитанные с помощью интерфейса *local conservative coupling*; штрихпунктирной линией показаны характеристики, рассчитанные с помощью интерфейса *non reflecting 1D*.

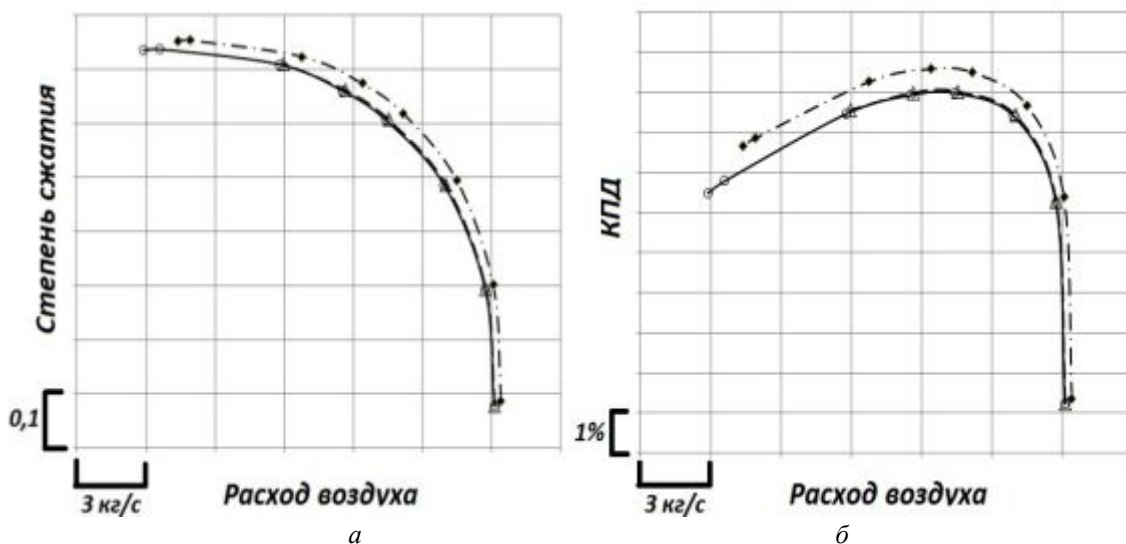


Рис. 3. Рассчитанные характеристики компрессора с различными типами интерфейсов: а) напорная, б) КПД

Из анализа графиков, представленных на рис. 3, видно, что расчёт с использованием интерфейсов *non reflecting 1D* и *full non matching mixing plane* дают разные по величине, но сравнимые по величинам запасов устойчивой работы результаты; расчёт с использованием интерфейсов *local conservative coupling* и *full non matching mixing plane* даёт равные по величине, но существенно различающиеся

по величинам запасам устойчивой работы результаты.

Дальнейшие исследования было решено проводить с использованием интерфейса *full non matching mixing plane*.

На рис. 4 показана система скачков уплотнений в первом рабочем колесе рассматриваемого компрессора на частоте вращения 5000 об/мин при различных перепадах давления с использованием интерфейса *full non matching mixing plane*.

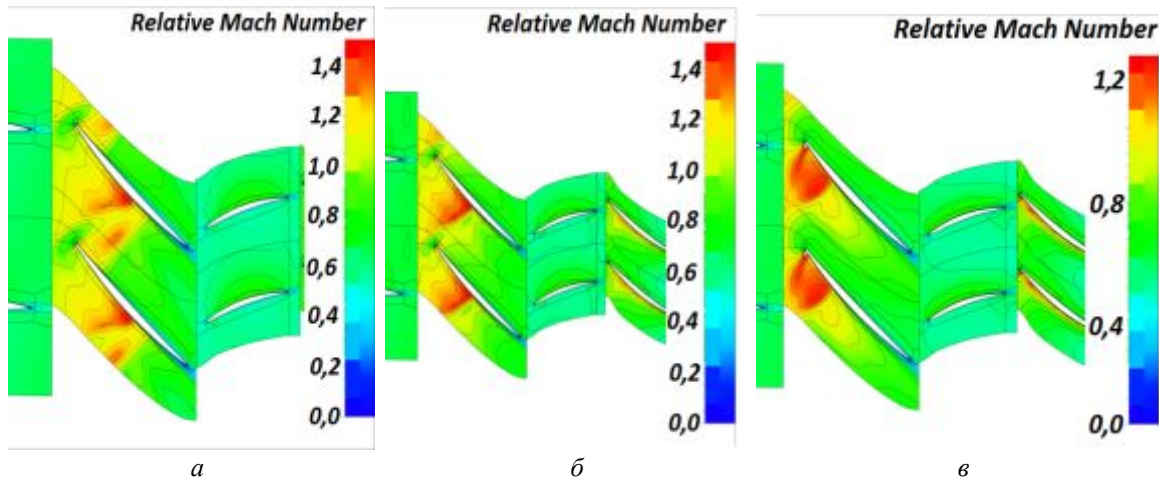


Рис. 4. Система скачков уплотнения в первом РК КНД:  
 а) на режиме заправки, б) на расчётном режиме, в) на режиме срыва

Для валидации созданной численной модели был проведён расчёт характеристик КНД на частотах вращения 4200 об/мин, 4600 об/мин, 5000 об/мин.

Результаты расчёта характеристик и их сравнение с экспериментальными приведены на рис. 5.

Из графиков видно, что рассчитанные напорные и КПД ветки имеют некоторое отклонение от экспериментальных, но позволяют точно описывать тенденции изменения характеристик компрессора.

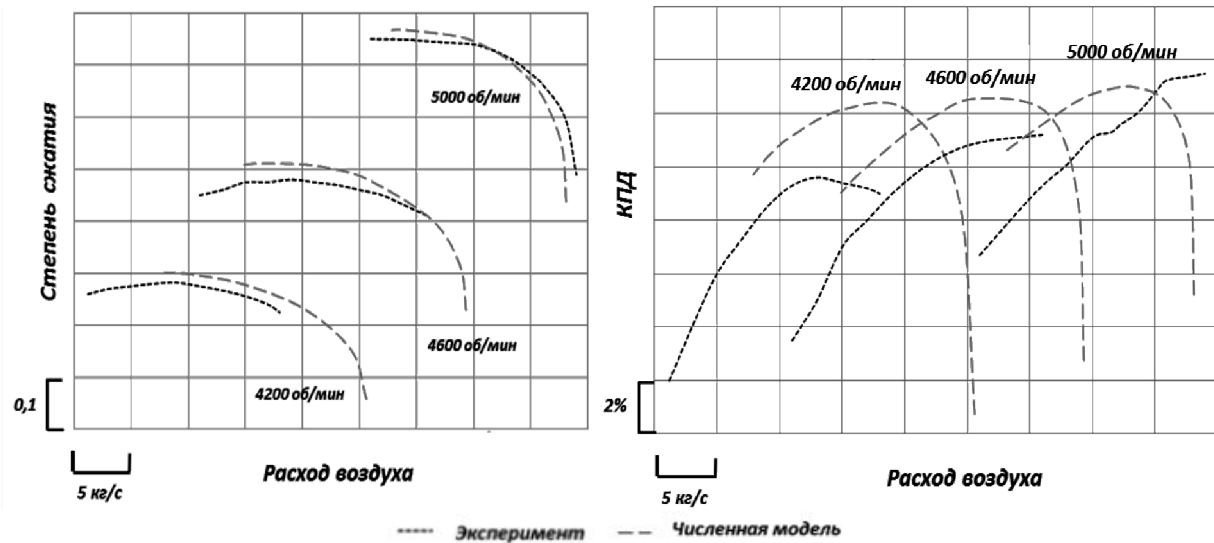


Рис 5. Рассчитанные характеристики КНД: а) напорная, б) КПД

Как известно, отбор воздуха от компрессоров может оказывать существенное влияние на их характеристики [2].

Для изучения влияния отбора воздуха на характеристики компрессора был выполнен расчёт характеристик с помо-

щью численной модели с учётом отбора воздуха за первым направляющим аппаратом КНД. Сравнение с характеристиками, рассчитанными без учёта отбора, показано на рис. 6.

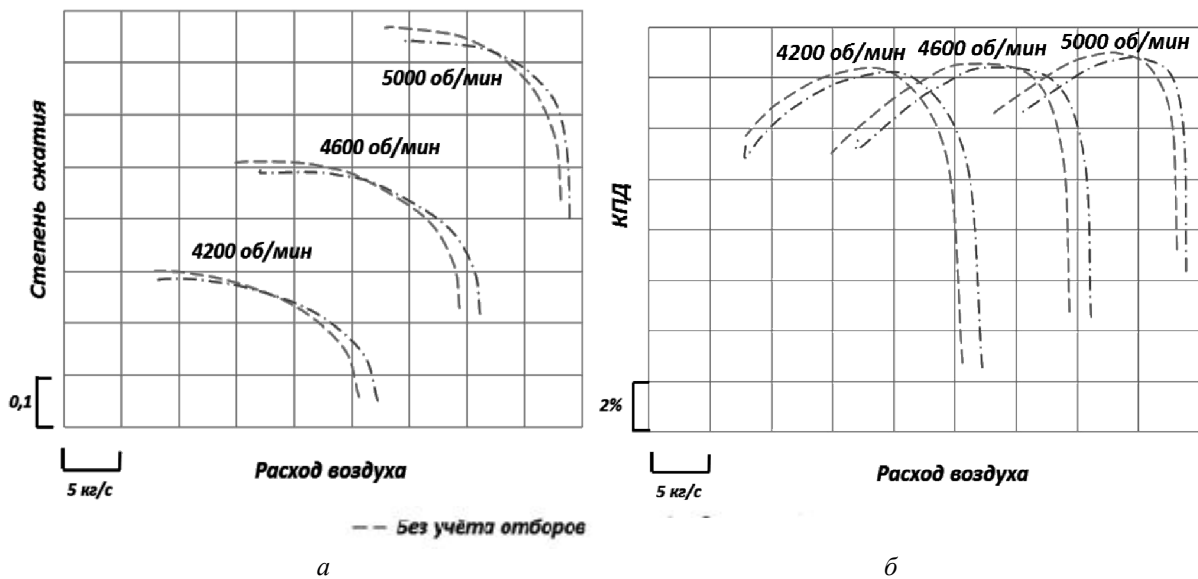


Рис. 6. Сравнение рассчитанных характеристик с учётом отбора и без: а) напорная, б) КПД

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1 При расчётах компрессоров со сверхзвуковыми ступенями тип интерфейса между вращающимися и неподвижными доменами может оказывать влияние на результаты расчёта.

2 Созданная расчётная модель позволяет адекватно оценивать характеристики компрессора во всем диапазоне частот вращения.

3 Отбор воздуха за первой ступенью КНД приводит к падению степени сжатия до 1% на повышенных режимах и незначительно влияет на степень сжатия на малых режимах.

4 Отбор воздуха из-за первой ступени КНД приводит к падению КПД на величину до 0,1%.

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания.

### Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. М.: Машиностроение, 2008. 368 с.

2. Кулагин В.В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. для вузов М.: Машиностроение, 2003. 616 с.

### Информация об авторах

**Матвеев Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: mvn@ssau.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, проектирование малоразмерных турбоприводов.

**Попов Григорий Михайлович**, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: grishatty@gmail.com. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, рабочие процессы.

**Горячкин Евгений Сергеевич**, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет).

венный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: evgeni0063@yandex.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика.

**Смирнова Юлия Дмитриевна**, инженер кафедры теории двигателей лета-

тельных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: Y.D.Smirnova@yandex.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика.

## **PECULIARITIES OF MODELING THE WORK PROCESS IN A LOW-PRESSURE COMPRESSOR OF A GAS TURBINE PLANT**

© 2014 V.N. Matveev, G.M. Popov, E.S. Goryachkin, Yu.D. Smirnova

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The problem of weight decrease is crucial for modern gas turbine engines. Application of supersonic and transonic compressors is one of the ways of solving this problem. This allows reaching a higher pressure ratio at each stage than while using subsonic compressors and thus reducing the number of stages required to produce the desired value of pressure ratio. In compressors of this kind the flow is slowed down due to a system of shockwaves in the supersonic part and due to the flow deflection in the diffuser channels formed by the rotor blades and guide vanes in the subsonic part. The design of new compressors and modernization of old ones is inextricably connected with the usage of computational fluid dynamics methods at the present stage of engine construction development. The necessity of simulating a shockwave system imposes high demands on the construction of a computational mesh. In particular, the choice of the method of parameter passing between the domains of rotating blades and those of fixed guide vanes is an urgent task. It is shown in the paper that the use of different methods of averaging and parameter passing between domains can make a significant difference in compressor design characteristics (for example, a three-stage low-pressure compressor). Three methods of passing parameters between the domains that are used in the software package NUMECA/Fine Turbo are analyzed. The calculated compressor characteristics are compared with the experimental data at different rotation frequencies of the rotor. The data obtained show the adequacy of the numerical model of the work process in the compressor under investigation. Typically, air bleeding for various needs takes place in compressors. Compressor performance changes when the air enters it, which should be considered in the calculations. It is shown in the example of the compressor tested that the inclusion of air bleeding results in quantitative and qualitative changes in the compressor performance. Among other things, parameters like pressure ratio and dynamic stability margin are changed, which may lead to inconsistent operation of the compressor as part of the engine. Thus, a conclusion about the necessity of taking into account the simulation of air bleeding in the calculation of supersonic compressors is made. The results obtained make it possible to expand the understanding of the working process of supersonic and transonic compressors and can be used later in the creation of numerical computational models of compressors of this type.

*Low-pressure compressor, fluid dynamics, interface, experiment.*

### **References**

1. Inozemtsev A.A., Nihamkin M.A., Sandrackiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok: uchebnyk* [Basics of design of aircraft engines and power plants: textbook for higher schools]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2008. 368 p.

2. Kulagin V.V. *Teoriya, raschet i proektirovanie aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok: ucheb. dlya vuzov* [Theory, analysis and design of aircraft engines and power plants: textbook for higher schools]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2003. 616 p.

#### **About the authors**

**Matveev Valery Nikolayevich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Aircraft Engines Theory, Samara State Aerospace University. E-mail: mvn@ssau.ru. Area of Research: work processes in turbomachines, computational fluid dynamics, design of small-sized turbine drives.

**Popov Grigory Mikhailovich**, postgraduate student of the Department of Aircraft Engines Theory, Samara State Aerospace University. E-mail: grishatty@gmail.com. Area of Research: work processes in turbomachines, computational fluid dynamics, work processes of jet engines.

**Goryachkin Evgeny Sergeevich**, postgraduate student of the Department of Aircraft Engines Theory, Samara State Aerospace University. E-mail: evgeni0063@yandex.ru. Area of Research: work processes in turbomachines, computational fluid dynamics.

**Smirnova Yulia Dmitrievna**, engineer of the Department of Aircraft Engines Theory, Samara State Aerospace University. E-mail: Y.D.Smirnova@yandex.ru. Area of Research: work processes in turbomachines, computational fluid dynamics.