

Создавайте продукты, оправдывающие  
ожидания Ваших клиентов™

**ANSYS®**

Вычислительная гидродинамика

# Оглавление

<b>Вступление</b> .....	<b>2</b>
<b>История</b> .....	<b>2</b>
<b>Сетки и численные методы</b> .....	<b>4</b>
<b>Моделирование турбулентности</b> .....	<b>6</b>
<b>Теплообмен</b> .....	<b>7</b>
<b>Химически реагирующие потоки</b> .....	<b>9</b>
<b>Многофазные потоки и массообмен</b> .....	<b>11</b>
Эйлера модель VOF .....	<b>12</b>
Эйлера модель Mixture .....	<b>12</b>
Полная Эйлера модель Eulerian .....	<b>13</b>
Эйлера модель пленки жидкости EWF .....	<b>14</b>
Лагранжева модель DPM .....	<b>14</b>
Лагранжева модель DEM .....	<b>14</b>
Ограничения моделей .....	<b>15</b>
<b>Турбомашин</b> .....	<b>16</b>
Удобная работа с геометрией турбомашин .....	<b>16</b>
Корректировка геометрической модели турбомашин .....	<b>17</b>
Автоматическое построение сетки .....	<b>17</b>
Вращающиеся машины в ANSYS CFD .....	<b>18</b>
Автоматизированный пре- и постпроцессинг .....	<b>19</b>
<b>Акустика</b> .....	<b>20</b>
<b>Деформируемые и подвижные сетки</b> .....	<b>21</b>
<b>Междисциплинарные расчеты</b> .....	<b>22</b>
<b>Постпроцессинг</b> .....	<b>26</b>
<b>Высокопроизводительные вычисления</b> .....	<b>27</b>
<b>Сводные таблицы применимости продуктов</b> .....	<b>29</b>

## Вычислительная гидродинамика

### Вступление

Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics — CFD) или численное моделирование в гидродинамике — это совокупность теоретических, экспериментальных и численных методов, предназначенных для моделирования течения жидкостей и газов, процессов тепло- и массообмена, реагирующих потоков и пр.

Компания ANSYS, Inc. предлагает несколько пакетов и лицензионных опций для решения задач вычислительной гидродинамики:

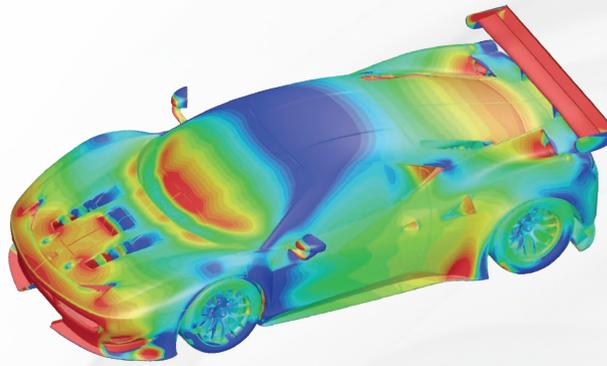
- **ANSYS® CFX®** — полноценный CFD-пакет, в состав которого входят пре- и постпроцессоры, решатель и отдельный сеточный генератор ANSYS Meshing. ANSYS CFX включает в себя уникальные технологии и методы для моделирования течения газа в проточной части турбомашин.
- **ANSYS® Fluent®** — полноценный CFD-пакет, не уступающий по функциональным возможностям ANSYS CFX, и специализирующийся на моделировании многофазных потоков и процессов горения.
- **ANSYS® CFD™** — лицензионная опция, в которую включены оба решателя, ANSYS CFX и ANSYS Fluent.
- **ANSYS® CFD-Flo™** — лицензионная опция, в которую включены ограниченные возможности решателя ANSYS CFX: отсутствует нестационарный решатель; SAS/DES модели турбулентности и возможность моделировать ламинарно-турбулентного перехода; множественные вращающиеся системы координат; модели взаимодействия ротор-статор, в том числе методы TBR; внешнее излучение; расчет линий тока частиц с учетом массы;

связанное моделирование дискретной фазы; химические реакции/горение и пр. (более подробно см. таблицу 3. Возможности CFD-продуктов ANSYS).

- **ANSYS® CFD Professional™** — лицензионная опция/программа, которая содержит еще большее количество ограничений по сравнению с ANSYS CFD-Flo: отсутствуют сжимаемые потоки; пористые среды; естественная конвекция; неньютоновские жидкости; RSM, LES, SAS, DES и др. модели турбулентности; динамические и деформируемые сетки; «решатель» 6-DOF; кавитация; акустика; многофазные потоки и пр.
- **ANSYS® Polyflow®** — специализированный пакет, который предназначен для моделирования технологических процессов, характерных для производства изделий из полимеров/пластмасс, резины, стекла.

### История

Многие из определяющих работ в области вычислительной гидродинамики были выполнены в Лос-Аламосской лаборатории (США) группой T-3 в период 1958-1967 гг. В 1957 году Ф. Харлоу (F. H. Harlow) разработал метод Particle-in-Cell (PIC — метод частиц в ячейках) для решения задач гидродинамики в одномерной постановке. Позднее расчетная схема была переработана для использования в задачах с двумя и тремя пространственными переменными. В 1965 г. тот же Ф. Харлоу совместно с Дж. Уэлчем (J. E. Welch) разработали известный метод Marker-And-Cell (MAC —



метод маркеров и ячеек). В методе MAC рассматриваются частицы-маркеры, которые непосредственно не участвуют в вычислениях, однако, отслеживая положение отмеченных частиц маркеров, можно получить картину, аналогичную той, которую мы наблюдаем в гидродатке при введении красящего вещества. В 2004 г. Ф. Халроу был награжден медалью Los Alamos Medal за выдающийся вклад в развитие численных методов моделирования.

Важным этапом в развитии коммерческих CFD-кодов стали работы Д. Б. Сполдинга (D. B. Spalding) и его коллег из Имперского колледжа Лондона (Imperial College London, Великобритания), выполненные в 1960–1970-х годах. Эти работы были посвящены развитию теории тепло-массопереноса с учетом процессов горения, а также построению новых моделей турбулентности. В 1974 г. Д. Б. Сполдинг создал собственную компанию для продвижения на рынок своего CFD-кода.

В этот период группа исследователей из Шеффилдского университета (Sheffield University, Великобритания) под руководством доктора Дж. Свитенбанка (J. Swithenbank) и финансовой поддержке компании Creare занимались разработкой CFD-кода Fluent. Первый коммерческий релиз этого продукта вышел в октябре 1983 года.

В 1987 году на рынке появился код Flow-3d, разработанный в Управлении атомной энергетики Великобритании (United Kingdom Atomic Energy Authority, UKAEA). В середине 1990-х годов продукт Flow-3d был переименован в CFX-4.

В середине 2000-х годов оба кода, CFX и Fluent, были приобретены компанией ANSYS, Inc.

В настоящее время большинство ведущих компаний мира используют продукты линейки ANSYS CFD, которая включает два базовых пакета, ANSYS CFX и ANSYS Fluent, с дополнительными специализированными опциями или ограничениями, которые лицензируются отдельно.

В комплексах представлен наиболее широкий спектр современных физических моделей, а также существует возможность проводить мультидисциплинарные расчеты в рамках среды ANSYS Workbench.

Обширные возможности программных комплексов ANSYS CFD применяются в различных отраслях промышленности, в частности, для расчета задач внешней аэродинамики в авиационной, автомобильной и других отраслях; моделирования горения в энергетических котлах и камерах сгорания газотурбинных двигателей; при изготовлении стекольной продукции; исследованиях процессов движения крови по сосудам; изготовлении полупроводников; проектировании «чистых помещений» и водоочистных сооружений.

ANSYS CFD также используется для моделирования двигателей внутреннего сгорания, аэроакустических систем, внутренней гидродинамики в турбомашинах, а также при моделировании устройств, работающих с многофазными средами, например, нефтегазовых сепараторов.

ANSYS CFD полностью интегрирован в среду ANSYS Workbench, являющуюся основой инженерного моделирования, в нее интегрированы все инструменты и программные комплексы ANSYS. Адаптивная архитектура позволяет пользователям с легкостью создавать модели, начиная от задач гидродинамики до комплексного мультифизического взаимодействия систем



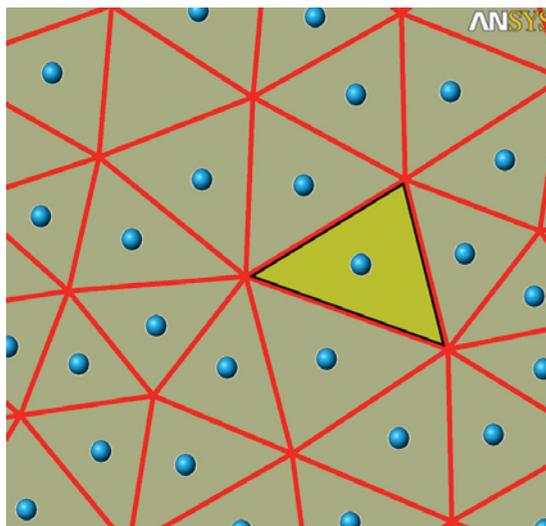
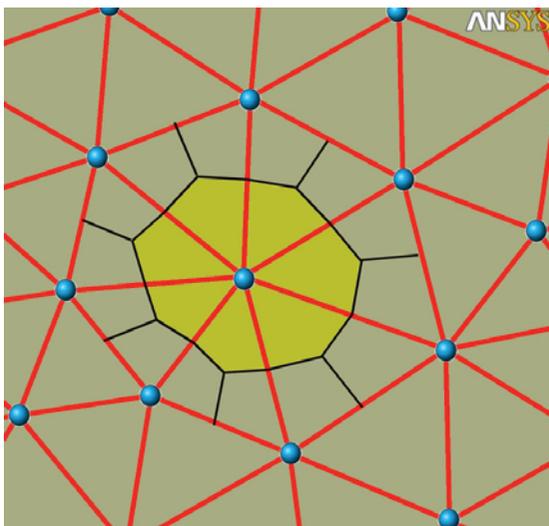


Схема контрольного объема, центрированного по узлу — CFX (слева) и центрированного по ячейке — Fluent (справа)

путем простых операций «перетаскивания» (drag-and-drop).

Пользователи могут с легкостью оценить параметры изделия в нескольких расчетных точках или сравнить ряд альтернативных концепций.

Среда ANSYS Workbench позволяет получить общий доступ к таким инструментам как связь с CAD-комплексами, построение и модификация геометрии и расчетной сетки. Постпроцессор ANSYS CFD-Post может использоваться для одновременного сравнения результатов нескольких расчетов, а также для создания высококачественных анимаций, иллюстраций и графиков.

Для удобства ознакомления с возможностями CFD-пакетов ANSYS, Inc. всю необходимую информацию мы сгруппировали в следующие разделы:

- Сетки и численные методы
- Моделирование турбулентности
- Теплообмен
- Химически реагирующие потоки
- Многофазные потоки и массообмен
- Вращающиеся машины
- Акустика
- Подвижные и деформируемые сетки
- Междисциплинарные расчеты
- Постпроцессинг
- Распределенные вычисления

## Сетки и численные методы

Решатели ANSYS CFD работают с неструктурированными и структурированными (регулярными) сетками, состоящими из элементов различных форм, например,

для двумерных сеток используются четырехугольные и треугольные элементы, а для трехмерных сеток — гексаэдральные, тетраэдральные, полиэдральные (только в ANSYS Fluent), призматические и пирамидальные элементы.

Большие расчетные сетки, содержащие 100 и более миллионов узлов и элементов, могут автоматически дробиться на части для расчета на кластере.

Для генерации сетки ANSYS предлагает несколько пакетов: ANSYS Meshing, ANSYS ICEM CFD, Fluent Meshing и ANSYS TurboGrid. Сеточный препроцессор ANSYS Meshing является базовым пакетом в Workbench и обладает универсальными возможностями. Его можно использовать для генерации сеток средней и большой размерности (до 800 млн. ячеек), а также для разбиения сборок до 100 деталей. ANSYS Meshing поддерживает работу в распределенном режиме и генерирует классические сетки на основе треугольников и четырехугольников при поверхностном разбиении, и на основе тетраэдров (с призмами) и шестигранников при разбиении объемов.

В сеточный препроцессор ANSYS ICEM CFD встроена уникальная технология, позволяющая генерировать структурированные/неструктурированные блочные сетки на основе шестигранников. Кроме того, это единственный препроцессор в линейке ANSYS, который поддерживает экспорт сетки более чем 30+ сторонних решателей.

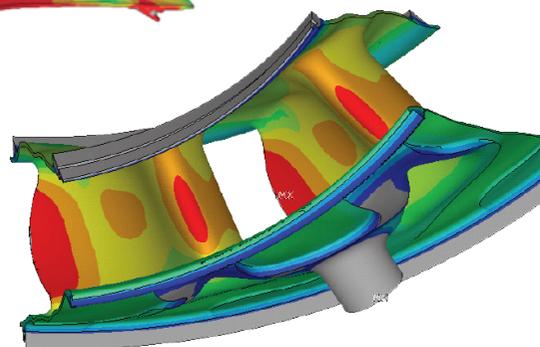
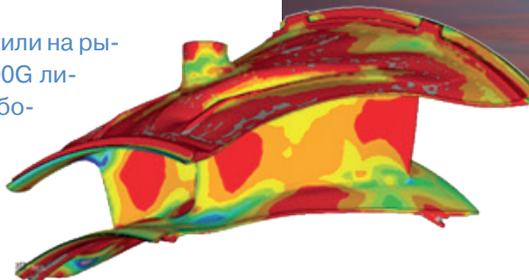
Препроцессор Fluent Meshing (TGrid) интегрирован в решатель ANSYS Fluent, тем не менее он может использовать и при решении задачи в ANSYS CFX. Как правило, Fluent Meshing используют для разбиения

**Известная благодаря своим инновационным продуктам, компания Pratt & Whitney уже на протяжении 35 лет полагается на компьютерное моделирование как основу создания новых изделий.**

Ал Брокетт, бывший вице-президент инженерного центра компании: «Новые продукты, которые мы разрабатываем, представляют собой многомиллиардные инвестиции. Моделирование позволяет обезопасить данные инвестиции: благодаря этому тысячи инженеров и специалистов во всем мире работают эффективно и слаженно, что сводит к минимуму дорогостоящие доработки.

В июле 2008 года компания Pratt & Whitney выпустили на рынок инновационный авиационный двигатель PW1000G линейки «PurePower». Мы никогда бы не смогли разработать данный продукт при дефиците времени и высокой конкуренции без использования компьютерного моделирования. Прежде всего, нам потребовалось моделирование для разработки технологии Geared Turbofan™, являющейся основой нового двигателя.

Далее мы использовали моделирование для демонстрации и обоснования преимуществ нового продукта для наших клиентов во всем мире. Этот двигатель является технологическим прорывом и обладает такими большими преимуществами, что сначала наши клиенты не могли в них поверить. Для того чтобы показать им в действии двигатель Geared Turbofan™, было бы необходимо построить демонстрационный стенд, обеспечить его работу в течение тысяч часов и перевозить его по всему миру. Компьютерное моделирование дало нам возможность сделать то же самое в виртуальном пространстве. Когда мы показывали результаты расчетов нашим клиентам наряду с физическими доказательствами надежности двигателя, они не могли отрицать преимущества нового проекта».



фасеточной геометрии или геометрии, сохраненной в формате STL.

Более подробно о сеточных препроцессорах вы можете прочитать в нашем каталоге «Комплексные решения».

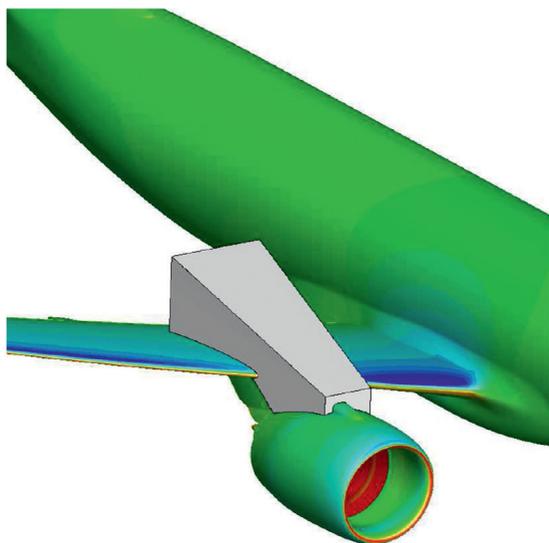
В основе ANSYS CFD лежат современные устойчивые решатели такие как, pressure-based (CFX), pressure-based coupled (Fluent), fully-segregated pressure-based и два density-based решателя (так же Fluent), позволяющие получать устойчивое и точное решение для сжимаемых и несжимаемых потоков, при высоких и низких числах Маха и Рейнольдса.

В ANSYS CFX и ANSYS Fluent используются отличные друг от друга методы пространственной дискретизации: в пакете CFX — метод CV-FEM (control-volume-based finite element method или метод конечных объемов/конечных элементов с расчетом переменных в узлах), в пакете Fluent — метод CC-FVM (метод конечных объемов с расчетом неизвестных в центрах ячеек).

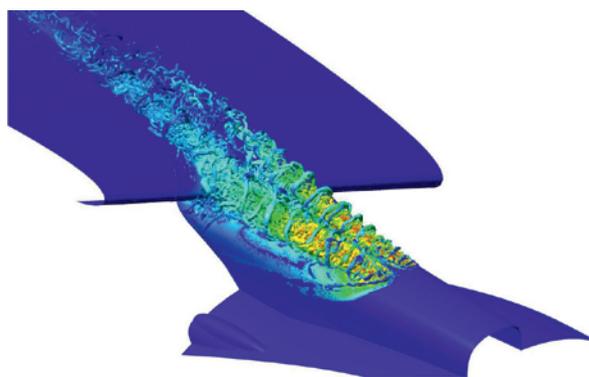
Оценить преимущество одного кода над другим достаточно сложно, так как суще-

ствует много областей внутри кода, где стратегия дискретизации и достижения сходимости на итерациях, напрямую не связаны с формулировкой метода конечного объема. Поэтому мы укажем лишь на очевидные достоинства и недостатки обоих методов. Метод CV-FEM (CFX) позволяет с высокой точностью вычислять градиенты и производные, поскольку грани, на которых они вычисляются, расположены точно посередине между двумя соседними узлами геометрической сетки. Поэтому для задач конвекции-диффузии данный метод дает лучшее приближение к решению, чем методы с расчетом неизвестных в центрах ячеек.

В методе CC-FVM (Fluent) грани контрольного объема совпадают с гранями ячейки исходной сетки и расчетным узлом является центр геометрической ячейки. Это отчасти ослабляет контроль над распределением вычислительных узлов по расчетной области, кроме того, градиенты и производные, вычисляемые на гранях, имеют меньший порядок точности. С другой стороны, величины, полученные инте-



Метод адаптивных масштабов SAS-SST. Расчет системы противообледенения мотогондолы самолета



грированием по объему, имеют более высокую точность.

Решатели ANSYS CFD прекрасно масштабируются, параллельный расчет возможен на всех типах платформ Windows и Linux. Могут использоваться как многопроцессорные, так и кластерные системы.

Технология динамической балансировки автоматически отслеживает и анализирует производительность параллельного счета, при этом происходит перераспределение расчетных элементов между процессорами так, чтобы сбалансировать нагрузку на процессоры при использовании сложных физических моделей.

Основные усилия ANSYS, Inc. при работе над 15-й версией были направлены на увеличение скорости решателей для различных приложений и типов расчетов. Также значительно повысилась производительность решателей ANSYS CFX и ANSYS Fluent при распределенных вычислениях.

## Моделирование турбулентности

Турбулентные потоки являются наиболее часто встречающейся и, вместе с тем, наиболее сложной формой движения жидкостей и газов. Турбулентность представляет собой чрезвычайно сложный объект для исследования, поскольку является системой с очень большим количеством степеней свободы и обычно характеризуется широкополосным набором различных компонент движения и внутренних сил, среди которых существенную роль играют мелкомасштабные и высокочастотные составляющие.

ANSYS Fluent и ANSYS CFX содержат в себе широкий спектр разнообразных моделей турбулентности — это и проверенные временем RANS-модели (осреднение по Рейнольдсу), и современные методы крупных и отсоединённых вихрей LES и DES, соответственно, а также гибридные модели, сочетающие преимущества RANS- и LES-моделирования.

Наиболее популярной однопараметрической моделью турбулентности, которая широко используется в задачах внешней аэродинамики при расчете безотрывных течений, является модель Спаларта-Алмараса. В этой модели вихревая вязкость определяется из одного дифференциального уравнения переноса турбулентной кинетической энергии. С введением поправок на кривизну, вращение и шероховатость, область применения этой модели существенно расширилась.

Для расчета безотрывных течений или течений с ограниченными отрывными зонами можно также использовать и двухпараметрические модели типа  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$ . В первом случае рассчитывается уравнение для турбулентной диссипации  $\varepsilon$ , во втором — для удельной скорости диссипации турбулентной энергии  $\omega$ .

Для тонкого пограничного слоя модель  $k-\omega$  более точно предсказывает положение точки отрыва, чем модель  $k-\varepsilon$ . Однако при расчете внутренних течений модель  $k-\omega$ , как правило, работает хуже, чем  $k-\varepsilon$ . Также при использовании модели турбулентности  $k-\omega$  следует помнить, что она очень чувствительна к граничным условиям во внешнем потоке.

В том случае, если вам необходимо рассчитать анизотропную турбулентность, то есть турбулентность, зависящую от на-

правления, или исследовать неравновесные эффекты, вы можете использовать модель Рейнольдсовых напряжений (Reynolds-Stress Model). Эта модель дает наиболее точные результаты для сложных течений с вторичными потоками, однако требует значительно больше вычислительных ресурсов, чем стандартные двухпараметрические модели.

Помимо полуэмпирических моделей, базирующихся на использовании RANS, вы можете проводить расчеты на основе LES (метод крупных вихрей) и DES (метод отсоединенных вихрей) методов.

Основная идея метода LES заключается в локальном осреднении характеристик турбулентного течения по областям с размерами порядка фильтра: мелкомасштабная часть спектра «моделируется», а вихревые структуры с размерами, превышающими размеры фильтра, разрешаются «точно». Основные области применения LES: задачи аэроакустики, горения, смешивания, метеорологии и пр.

Метод отсоединенных вихрей DES можно условно назвать гибридным методом LES/RANS. При его использовании в пограничном слое используются нестационарные уравнения Рейнольдса, в то время как метод LES применяется в отрывных зонах. LES-зоны, как правило, расположены в области турбулентных течений, где доминируют крупномасштабные турбулентные структуры. В пристеночной области используются соответствующие RANS-модели.

Метод DES применяется в основном для моделирования высокорейнольдсовых потоков; при моделировании внутренних течений точность этого метода существенно снижается. Вычислительные затраты при использовании метода DES меньше, чем при использовании LES, но больше, чем при использовании метода RANS.

При моделировании ярко выраженного нестационарного течения, целесообразно применять модель турбулентности SAS (Scale-Adaptive Simulation), которая является усовершенствованным вариантом нестационарного метода RANS (URANS) и позволяет получать достоверные результаты для пульсационной составляющей потока. В отличие от традиционных URANS-моделей, которые позволяют получить только крупномасштабные турбулентные структуры, модель SAS динамически адаптируется к решенным методом URANS масштабам и позволяет отследить развитие турбулентных структур в отдельных областях течения. Таким образом, в нестационарных областях потока SAS-модель рабо-

тует подобно методу LES, а в стационарных областях — аналогично RANS методу.

Благодаря постоянному увеличению производительности компьютеров и уменьшению их стоимости, модели LES и более экономичные модели DES стали чрезвычайно популярны при решении промышленных задач.

Спектр настроек моделей турбулентности и открытость для глубоких изменений позволяют моделировать разнообразные эффекты турбулентности для любых условий течения жидкости.

## Теплообмен

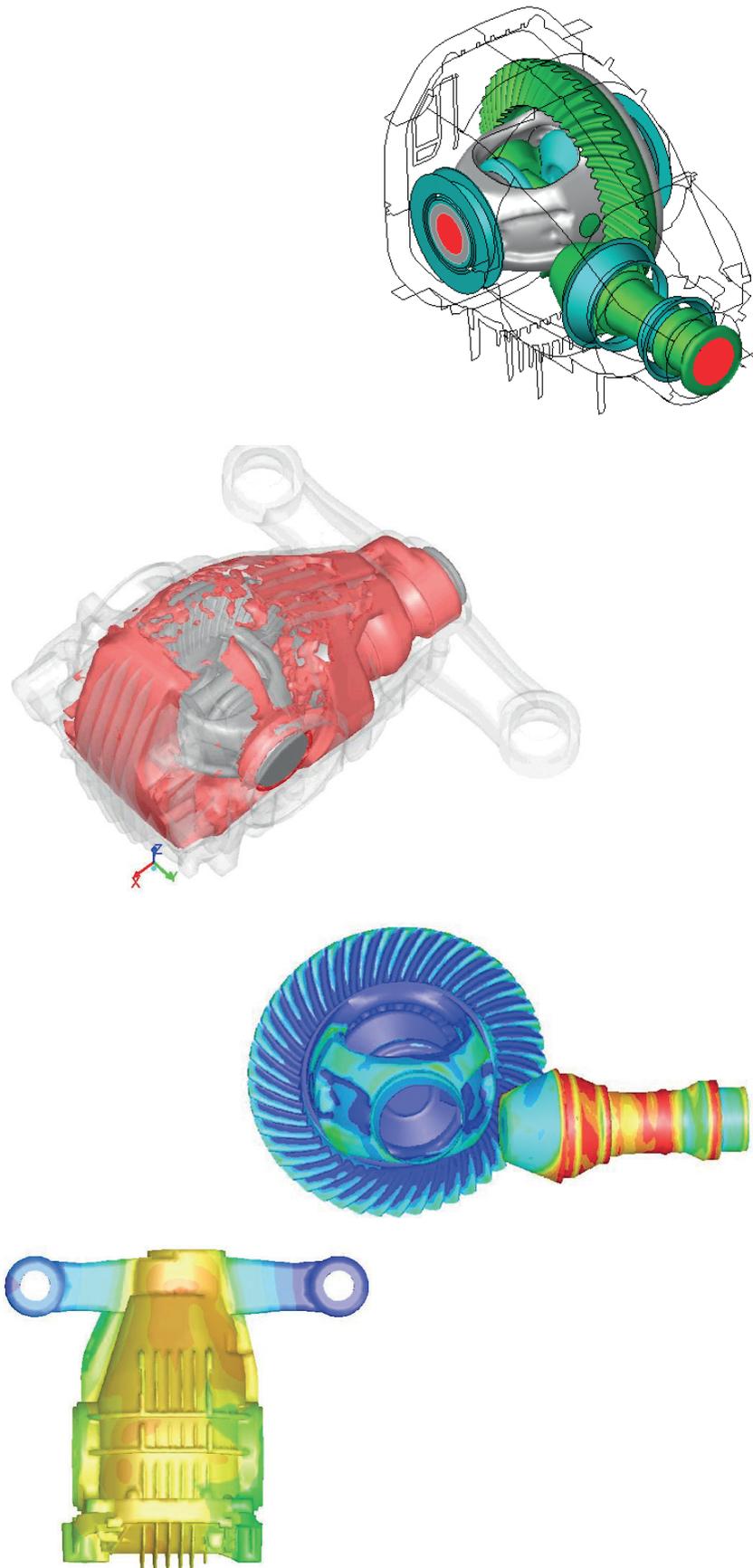
Большинство технических систем включают процессы теплопереноса в ходе своего функционирования. Тепловые процессы напрямую связаны с распределением температурного поля, они сопровождают химические реакции, связанные с выделением или поглощением тепла. При высоких скоростях потока тепловые процессы неразрывно связаны с гидродинамическими характеристиками. Они также являются неотъемлемым элементом процессов перехода веществ из одного агрегатного состояния в другое (фазовых переходов).

Такое вовлечение процессов теплопереноса в широкий спектр технических приложений определяет особые требования, предъявляемые к современным системам инженерного анализа для моделирования этих процессов.

Во-первых, это возможность учета всех трех основных типов теплопереноса: теплопроводности (как в текучей среде, так и в твердых телах), конвекции (свободной и вынужденной) и лучистого теплопереноса. В определенных условиях (обычно при высоких температурах) лучистый теплоперенос осуществляется не только между твердыми поверхностями, но и при участии текучей среды, когда она может активно поглощать и испускать лучистое тепло. Соответственно, подходы к моделированию лучистого теплообмена должны предусматривать возможности учета этих физических механизмов.

Во-вторых, необходимы развитые и глубокие подходы описания турбулентных характеристик потока вблизи границы между потоком и твердым телом, если они обмениваются теплом, поскольку турбулентность оказывает определяющее влияние на процесс теплоотдачи.

Так же должны быть предусмотрены модели фазовых переходов и учет тепловых



Компания Toyota использовала ANSYS Fluent для оценки температурного состояния главной передачи с дифференциалом: распределение масла в картере (модель VOF), распределение коэффициента теплоотдачи от масла к поверхностям привода; температурное состояние картера

эффектов при протекании этих физических явлений. Всем перечисленным требованиям удовлетворяют современные решения от компании ANSYS, реализованные на основе программных продуктов ANSYS Fluent и ANSYS CFX (более подробно см. таблицу сводных возможностей в конце каталога).

В последнее время основные усилия разработчиков связаны с развитием новых подходов моделирования таких сложных физических явлений, как фазовые переходы. В первую очередь это относится к фазовым переходам первого рода — процессам конденсации и испарения (кипения), плавления и затвердевания, сублимации и десублимации.

Перечень существующих моделей постоянно расширяется и дополняется, в частности, в версии 15.0 появилась возможность моделирования кипения в фазе переохлаждения, когда температура жидкости в большей части рассматриваемого объема ниже температуры насыщения, но температура стенки и прилегающей к ней текучей среды достаточно высоки для фазового перехода. Данная возможность была реализована в обоих программных кодах в рамках негомогенной континуальной модели многофазного расчета.

На практике часто встречаются конструкции, где присутствует регулярная или нерегулярная структура элементов с масштабом, отличающимся на несколько порядков от характерных размеров самой конструкции. Для таких случаев прекрасно себя зарекомендовала модель области пористого материала, имеющаяся в программных комплексах ANSYS CFD. Эта модель предполагает переход от детального просчета мелкомасштабных элементов к эффективному представлению области пространства, где они расположены в виде зоны с непрерывно распределенным гидравлическим сопротивлением. Область использования этого подхода достаточно обширна и включает течения через засыпки, фильтрующие элементы различной структуры, перфорированные пластины, пучки труб, системы газо- и водоподачи, автомобильные глушители, каталитические нейтрализаторы и т. п.

Одним из последних нововведений для модели области пористого материала стала возможность рассматривать теплообмен между потоком и структурой из мелкомасштабных элементов, которая этим потоком омывается. В качестве примера можно привести автомобильный глушитель, внутри которого расположена систе-

ма перфорированных трубок и перегородок (моделируемых как пористое тело), с которыми взаимодействует горячий газ.

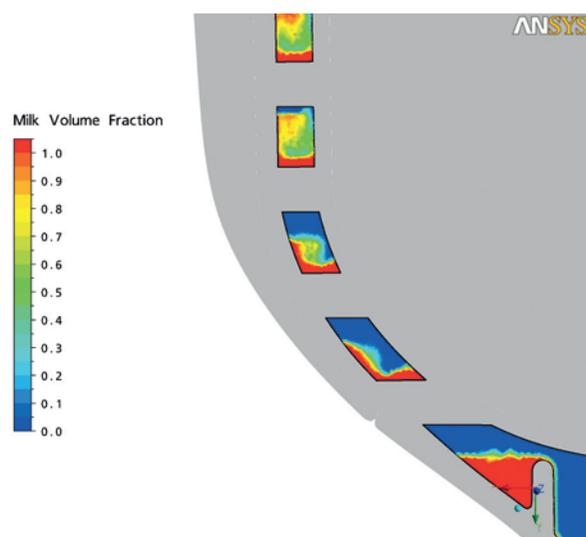
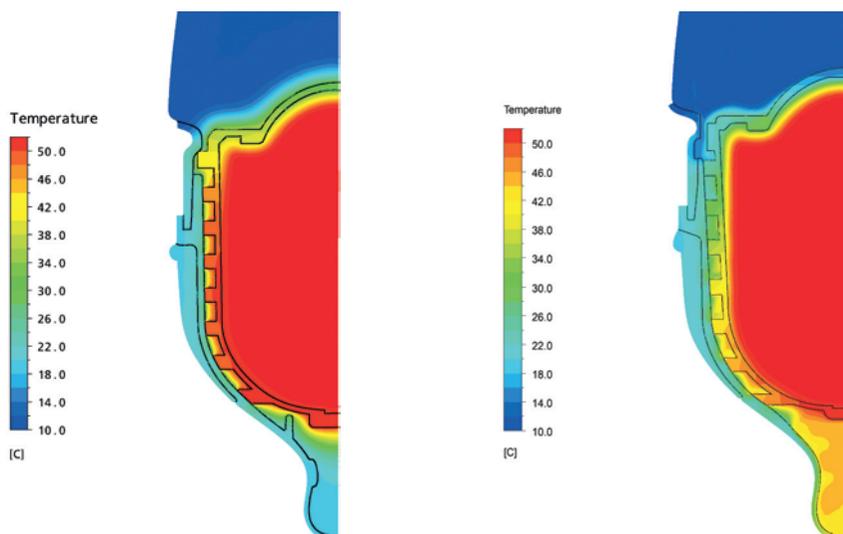
В отдельных случаях пользователь может самостоятельно задать некоторые теоретические или экспериментальные зависимости, и дополнить ими вычислительную модель. Для этого в ANSYS CFX следует использовать язык выражений CEL, а в ANSYS Fluent — макрос-шаблоны (UDF) на основе языка C. Средства пользовательского программирования также позволяют описать скалярную физическую величину и определить основные механизмы ее производства и диссипации, а также взаимодействие с другими гидродинамическими и тепловыми переменными. Тогда относительно этой величины возможно решение отдельного дифференциального уравнения переноса, описывающего физическое явление, которое не моделируется стандартными возможностями.

## Химически реагирующие потоки

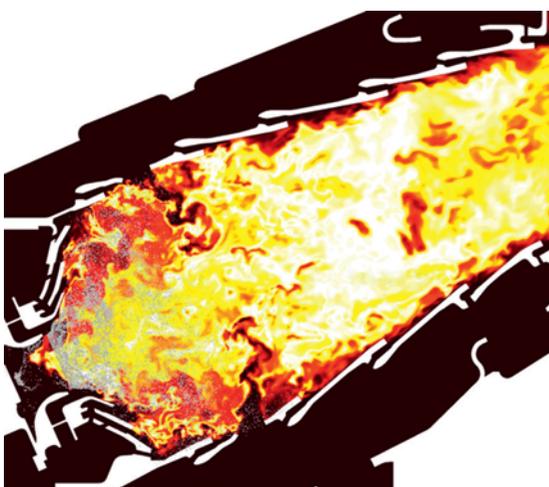
Химические реакции являются неотъемлемой частью функционирования как биологических, так и технических систем. Большинство химических реакций в силу особенностей агрегатного состояния протекает в жидких или газообразных средах. Помимо этого, существует определенный класс химических превращений, которые происходят внутри твердых тел, а также на границе раздела твердых веществ и жидких/газообразных.

Программные комплексы линейки ANSYS CFD предлагают самые передовые вычислительные технологии для моделирования химических превращений в жидкостях, газах и системах, состоящих из нескольких фаз. Кроме реакций, протекающих в объеме рассматриваемой среды, есть возможность исследования поверхностных реакций, которые локализуются в области непроницаемых для потока границ. При этом твердая стенка может выступать как в роли катализатора, так и в роли источника химических веществ, принимающих непосредственное участие в химическом превращении. Если существует необходимость моделирования твердотельных химических реакций, это может быть реализовано через гибкие и мощные средства пользовательского программирования.

Стоит обратить внимание на то, что химические реакции могут протекать со-



Бутилочка для кормления (Yoomi) с нагревателем. Нагревательный элемент (аккумулятор тепла) позволяет всего за одну минуту нагреть детское питание до температуры грудного молока. «Заряжать» нагреватель можно в микроволновой печи, в кастрюле с кипящей водой или паровом стерилизаторе. ANSYS CFX использовался для оптимизации конструкции нагревателя с целью улучшения процесса теплопередачи между нагревателем и смесью для питания



Типичные объекты моделирования: энергетический котел на пылеугольном топливе и авиационная камера сгорания

вместно с различными физическими процессами, которые имеют место, как правило, в результате выделения или поглощения тепла. Таковыми являются, в частности, испарение жидкости или выход летучих веществ. В ANSYS Fluent и ANSYS CFX предусмотрены эффективные подходы учета такого рода сопутствующих процессов.

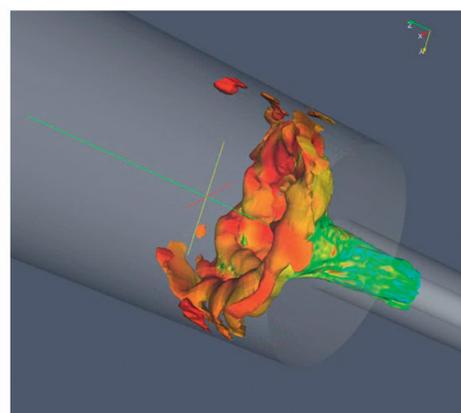
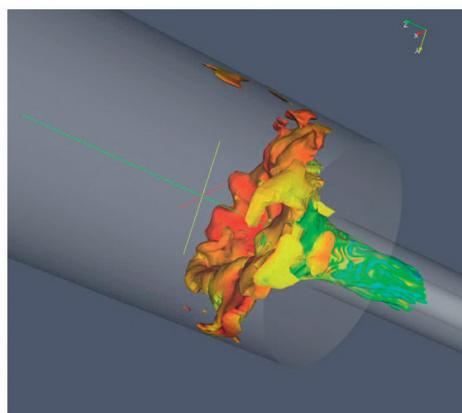
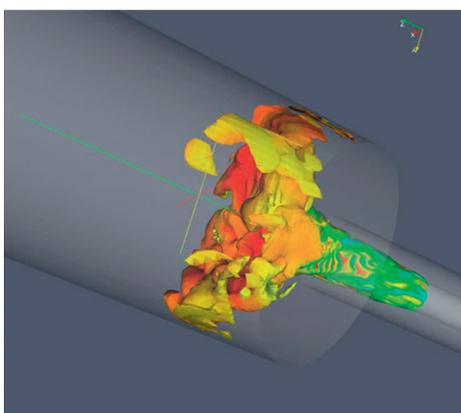
Большое внимание разработчиками всегда уделялось возможностям исследования процессов горения, поскольку это, пожалуй, самый востребованный класс задач, связанный с рассмотрением химических процессов в потоке.

Основные подходы для моделирования горения в газовой фазе основаны на допущении о том, что скорости химических реакций ограничены процессом турбулентного смешения компонентов. Базовая модель этого класса носит наименование модели распада вихря (Eddy-Dissipation Model).

Развитием базовой модели является модель концепции распада вихря (Eddy-Dissipation-Concept), в которой предусмотрен учет кинетических процессов. Кинетика рассматривается в мелких турбулентных структурах, названных тонкими масштабами.

В случаях, когда допущение о бесконечно быстром протекании химической реакции является неадекватным, допустимо использовать подход Finite Rate, в рамках которого скорость реакции вычисляется по закону Аррениуса. Необходимость в детальном рассмотрении кинетики химических реакций возникает, например, в задачах об иницировании горения, затухании пламени, образования загрязняющих веществ, неравновесном характере протекания реакций и т. д.

Возможности основных подходов для моделирования горения постоянно расширяются. Внедрены модели образования



Моделирование процесса воспламенения горючей смеси

оксидов азота, углерода и серы, а также выпадения сажи. Расширение возможностей в данном направлении представляет большой интерес для анализа экологичности разнообразных технических систем и технологических процессов.

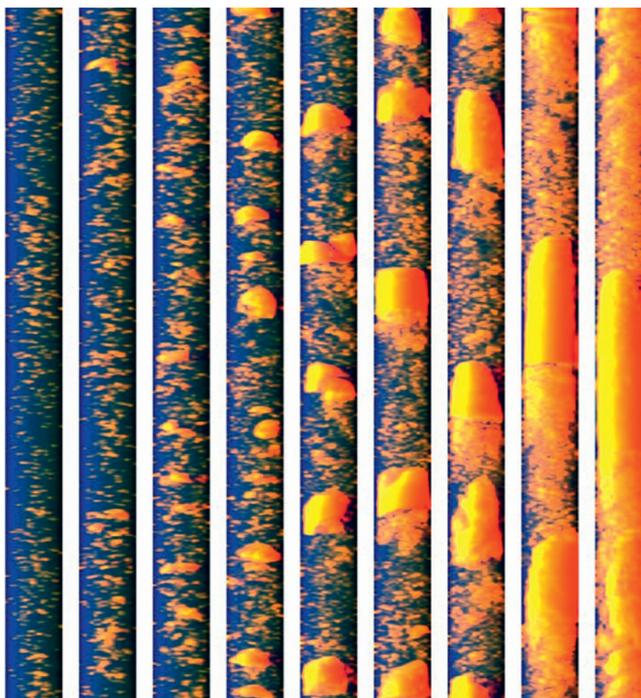
Довольно часто уравнение состояния идеального газа не является адекватным для описания параметров среды в условиях горения. В таких случаях возникает необходимость учета эффектов, присущих реальным газам. Программные продукты ANSYS CFD предлагают большой перечень зависимостей, описывающих поведение реальных газов.

## Многофазные потоки и массообмен

Многофазные течения встречаются во многих отраслях промышленности. Под многофазным обычно подразумевается совместное течение двух и более сред, находящихся в разном агрегатном состоянии. В вычислительной гидродинамике к многофазным также относят течение двух и более несмешивающихся жидкостей. Примерами многофазных течений являются течения со свободной поверхностью «жидкость-газ», течения с взвесью твердых частиц в газе или жидкости, течения с каплями жидкости в газе и с пузырьками газа в жидкости. На практике встречаются и более сложные случаи, например, течение со свободной поверхностью «жидкость-газ» и твердыми частицами, которые движутся в газе, осаждаются на свободной поверхности и тонут в жидкости.

Многофазные течения отличаются гораздо более сложной физикой, чем однофазные. Даже для такого простого течения, как течение в круглой трубе, возможны существенно разные режимы двухфазного течения: пузырьковый, снарядный, пенный, капельно-кольцевой, капельный. При этом одной универсальной модели, позволяющей моделировать все возможные режимы, не существует. Более того, для моделирования разных режимов иногда применяются совершенно разные подходы к моделированию.

В зависимости от подхода к моделированию модели многофазных течений разделяются на два основных класса: Лагранжевы и Эйлеровы модели. В основе Лагранжева подхода лежит рассмотрение движения отдельных частиц (или групп частиц) вторичной дисперсной фазы. В ос-



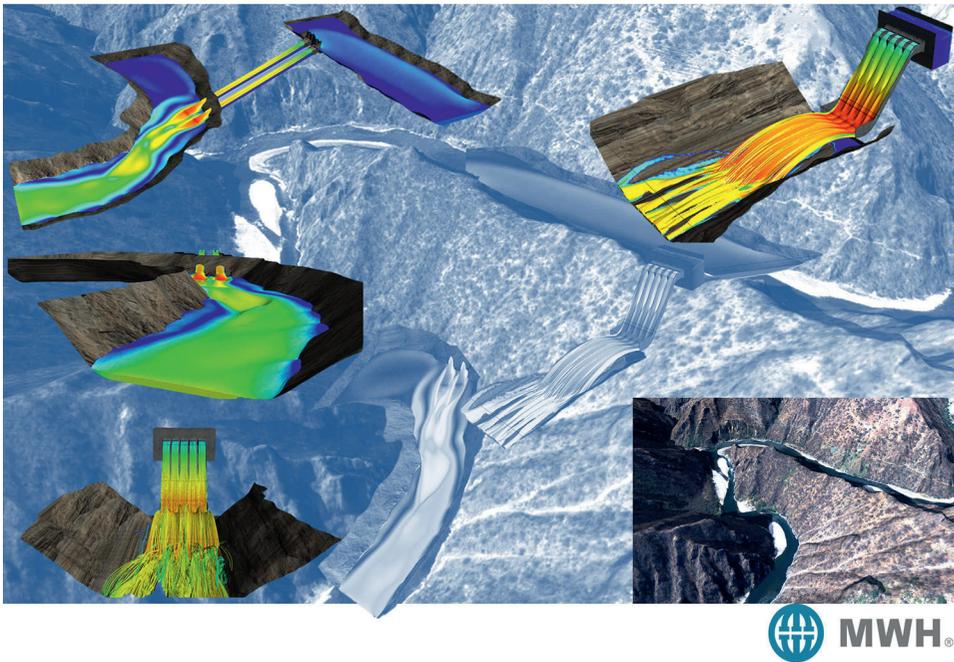
Различные режимы течения двухфазного потока в трубе (HZDR, ФРГ)

нове Эйлера подхода лежит рассмотрение изменений параметров течения (скоростей, давлений, температур) в точках пространства. Для многофазных течений при этом вводится понятие объемной доли фазы — еще одного дополнительного параметра течения. В рамках Эйлера подхода все фазы рассматриваются как сплошные, независимо от их реальной морфологии. Существуют также гибридные модели, в которых чередуются Лагранжев и Эйлера (усреднение по пространству и переход от реального распределения частиц к объемной доле) шаги.

В продуктах линейки ANSYS CFD имеются модели обоих классов. В ANSYS Fluent Лагранжев подход представлен моделями DPM (Discrete Phase Model — модель дискретной фазы) и DEM (Discrete Element Method — метод дискретного элемента). Последняя, хотя и была в свое время разработана как самостоятельная модель, как правило, используется как подмодель в рамках DPM.

Эйлера подход представлен моделями VOF (Volume of Fluid — метод объема жидкости), Mixture (модель многофазной смеси) и Eulerian (полная Эйлера модель, т.н. модель взаимопроникающих сред). Также есть специальная Эйлера модель для описания течения тонких пленок жидкости на стенке — модель EWF (Eulerian Wall Film — Эйлера модель пленки на стенке).

## HYDROPOWER



Проектирование плотин в ANSYS CFX (MWH, 2014)

Гибридный подход представлен моделью DDPM (Dense Discrete Phase Model — модель плотной дискретной фазы), построенной как комбинация моделей Eulerian и DPM.

В ANSYS CFX Лагранжев подход представлен моделью Particle Transport Model (модель переноса частиц), которая аналогична модели DPM в ANSYS Fluent. Эйлерав подход формально представлен одной моделью, но выбор различных подмоделей и опцией в ее рамках фактически позволяет получить практически тот же набор моделей, что и в ANSYS Fluent.

Отметим, что в ANSYS CFX нет гибридных моделей, прямого аналога Эйлеровой модели пленки жидкости на стенке и модели DEM.

Для правильного выбора модели необходимо знать как минимум класс течения: стратифицированный, т. е. с протяженной границей раздела фаз, или дисперсный, т. е. когда вторичная фаза присутствует в виде отдельных мелких элементов.

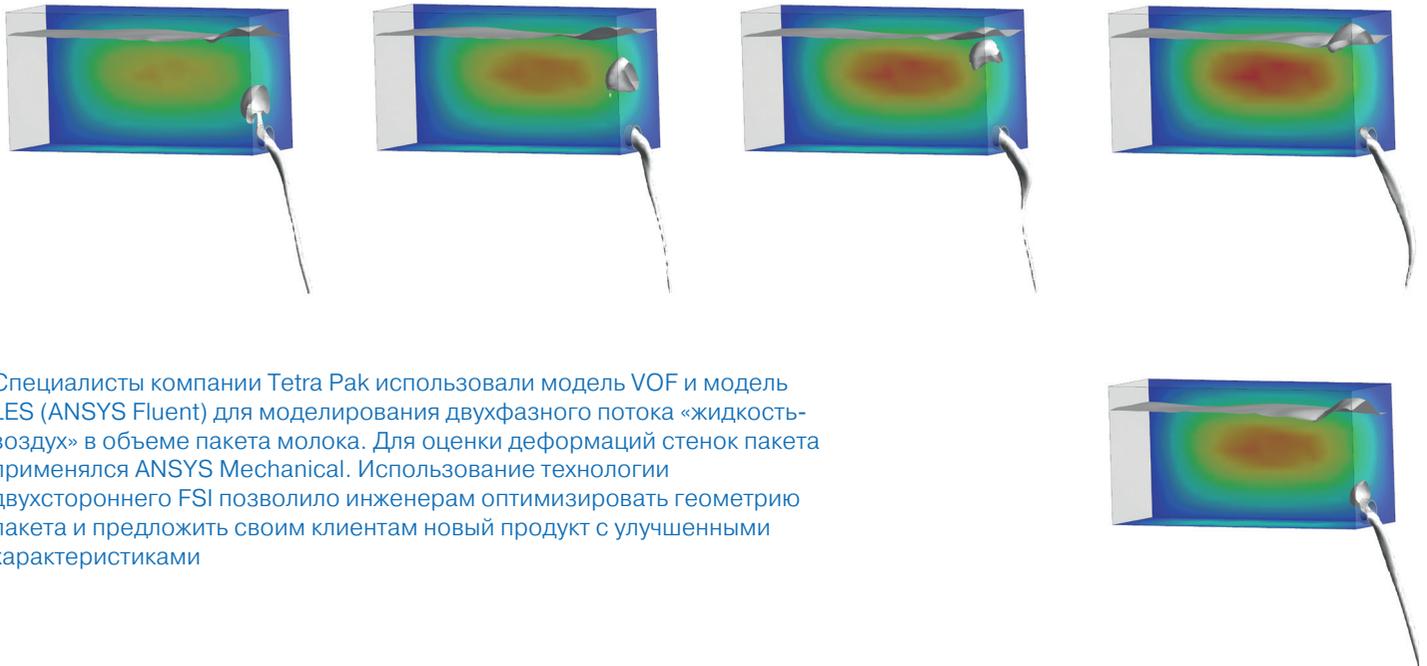
Моделирование смешанных режимов и перехода от одного режима к другому в принципе возможно, если оба режима поддерживаются выбранной моделью. В случае дисперсного режима также необходимо знать: 1. плотность дисперсной фазы (т.е. ожидаемые локальные значения объемной доли); 2. характерный размер ее элемента (капли, пузырька или зерна).

### Эйлерова модель VOF

Эйлерова модель VOF используется для моделирования стратифицированных течений несмешиваемых сред с четким протяженным (т.е. сравнимым по размеру с размерами расчетной области) интерфейсом (границей раздела). Форма этого интерфейса является единственным из результатов моделирования. Для всех фаз при этом решается один единый набор уравнений сохранения импульса, плюс уравнения переноса объемной доли каждой фазы. Область применения этой модели: стратифицированные течения, течения в открытых руслах, заполнение и опорожнение емкостей, плескание жидкости в емкости, движение очень больших пузырей газа в жидкости (например, снарядный режим течения), распад струи жидкости при истечении в газ и пр. Отрасли: судостроение, строительная (гидротехнические сооружения), нефтегазовая отрасль.

### Эйлерова модель Mixture

Эйлерова модель Mixture рассматривает течение многофазной смеси в дисперсном режиме как единого целого. Фазы считаются взаимопроницаемыми средами. При этом решается один набор уравнений сохранения импульса для определения поля скоростей смеси двух или более фаз. Скорости отдельных фаз могут вычисляться через поправки к скорости смеси. Поле

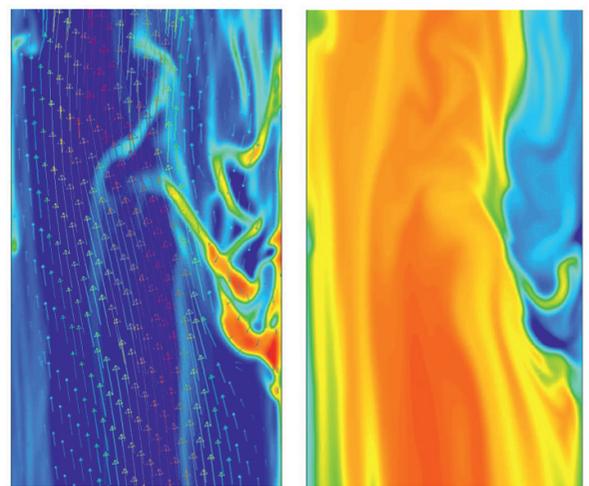
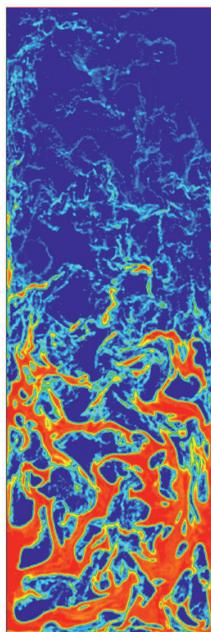


Специалисты компании Tetra Pak использовали модель VOF и модель LES (ANSYS Fluent) для моделирования двухфазного потока «жидкость-воздух» в объеме пакета молока. Для оценки деформаций стенок пакета применялся ANSYS Mechanical. Использование технологии двухстороннего FSI позволило инженерам оптимизировать геометрию пакета и предложить своим клиентам новый продукт с улучшенными характеристиками

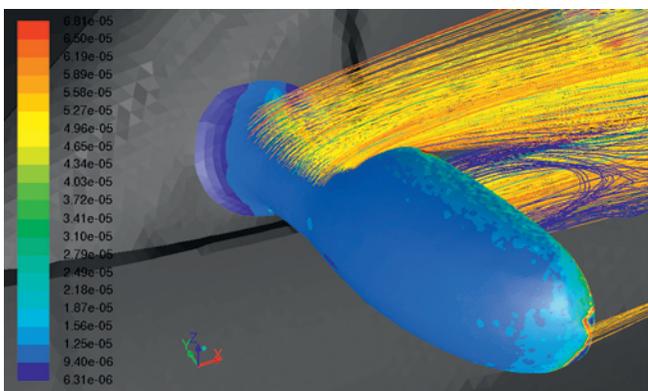
температуры у фаз при этом общее. Модель смеси подразумевает, что частицы дисперсной фазы относительно маленькие и легкие, поэтому их скорость мало отличается от скорости сплошной несущей фазы по величине и направлению. Области применения: пузырьковые течения и капельные, циклонные сепараторы. Часто эту модель применяют для моделирования кавитации. Отрасли: нефтегазовая, химическая, энергетическая и др.

### Полная Эйлерова модель Eulerian

Полная Эйлерова модель Eulerian позволяет рассматривать как дисперсные течения, так и стратифицированные (специальная подмодель Multifluid VOF). Во всех случаях фазы считаются взаимопроницающими. Модель в принципе позволяет рассматривать смену режима течения: дисперсный-стратифицированный. В рамках модели решается свой набор уравнений сохранения для каждой фазы. Взаимодействие фаз описывается дополнительными слагаемыми в уравнениях сохранения. Виды взаимодействия зависят от класса и режима течения. Существует специальный вариант модели для твердой дисперсной фазы, Eulerian Granular. Области применения: барботеры, кипящие теплообменники, течения эмульсий, суспензий и аэрозолей, псевдооживленные слои. Отрасли: нефтегазовая, химическая, энергетическая и др.



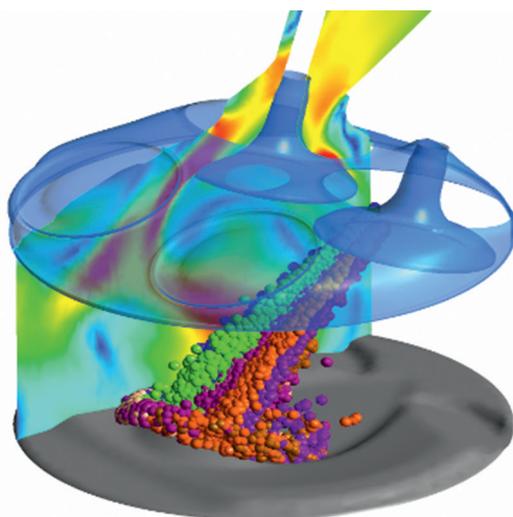
Технологическое развитие в энергетике связано не только с разработкой новых способов преобразования энергетических ресурсов, но и с разработкой эффективных и энергетически выгодных способов утилизации отходов и вредных выбросов, образующихся при производстве энергии, в том числе и на основе ископаемого топлива. Специалисты компании SINTEF (Норвегия) применили Эйлерову Гранулярную модель (Eulerian Granular) для численного исследования процесса «химического сжигания» углеводорода (Chemical Looping Combustion), основанного на окислении углеводорода при участии металлического катализатора



Пленка воды на боковом зеркале автомобиля: толщина пленки и срыв вторичных капель

### Эйлерова модель пленки жидкости EWF

Эйлерова модель пленки жидкости EWF позволяет моделировать течения очень тонких пленок, которые не разрешаются напрямую расчетной сеткой. Течение считается двумерным, с известным профилем скорости (параболическим) и температуры (билинейным) по толщине пленки. Модель может использоваться как совместно, так и в сочетании с другими моделями. В рамках модели можно рассматривать различные явления: оседание капель на стенку (для лагранжевых капель можно моделировать вторичное разбрызгивание), течение пленки под действием силы тяжести и внешней силы со стороны потока газа, срыв капель высокосортным потоком газа, отрыв пленки на ребре и ее дробление на капли (лагранжевы), влияние



Впрыск топлива в цилиндр ДВС

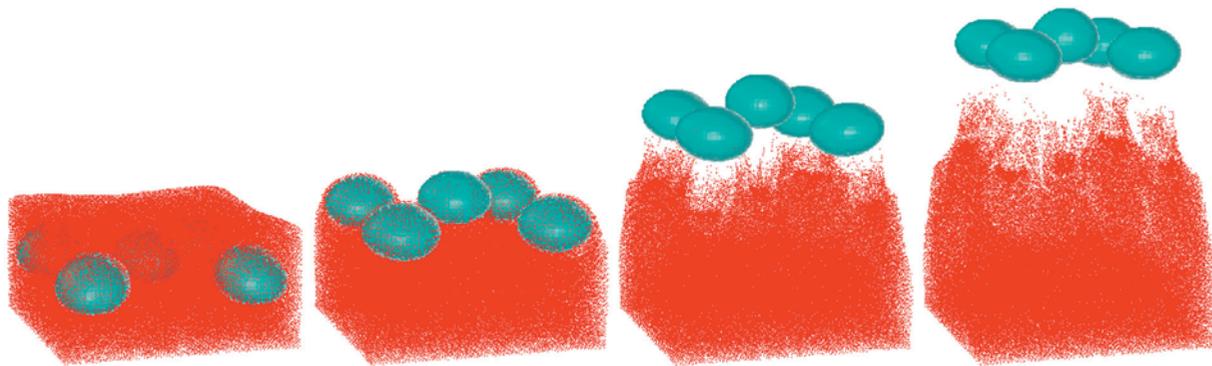
пленки на теплообмен между стенкой и газом, испарение и конденсацию пленки. Отрасли: автомобильная, аэрокосмическая, химическая и т. п.

### Лагранжева модель DPM

Лагранжева модель DPM подразумевает построение траекторий частиц дисперсной фазы в сплошной фазе на основе решения обыкновенных дифференциальных уравнений движения. Частицы могут быть как твердыми, так и пузырьками и каплями. Модель учитывает двухсторонний обмен массой, импульсом и энергией частиц со сплошной фазой. Модель применима для небольших значений объемной концентрации частиц, т. к. взаимодействие частиц между собой учитывается опосредовано. Для более точного учета взаимодействия частиц при увеличении концентрации используется гибридная модель DDPM. Модель подразумевает, что частицы не накапливаются в какой-либо части расчетной области, т. е. ее нельзя использовать для моделирования осаждения взвесей. Область применения: любые течения с относительно небольшой концентрацией частиц, если нужно учесть разброс/изменение размеров частиц, образование вторичных частиц, взаимодействие со стенкой. Отрасли: химическая, нефтегазовая, энергетическая, биомедицина.

### Лагранжева модель DEM

Лагранжева модель DEM может использоваться как дополнение к DPM для учета взаимодействия частиц между собой, так и в виде самостоятельной модели сыпучей среды. Эта модель напрямую рассматривает столкновения частиц и возникающие



Пример использования модели DEM в сочетании с моделью VOF

при этом силы. Реализация этой модели в ANSYS Fluent имеет большое число ограничений и упрощений. Область применения: поведение сыпучей среды в случаях, когда сплошная фаза (жидкость или газ) слабо влияет на течение. Отрасли: химическая, нефтегазовая, энергетическая.

### Ограничения моделей

Возможности Эйлеровых и Лагранжевых моделей для некоторых режимов течения перекрываются, в связи с чем возникает вопрос об их сравнительных преимуществах и недостатках. Преимущество Лагранжевой модели DPM состоит в том, что она позволяет точно учитывать характер взаимодействия частиц со стенкой. В рамках модели взаимодействия со стенкой есть дополнительная модель эрозии стенки. Кроме того, в рамках модели DPM гораздо проще учитывать мультidisперсность вторичной фазы и вторичный распад ее частиц (если это капли или пузырьки).

В рамках Эйлеровой модели также можно учитывать мультidisперсность и распад/слияние частиц, но для этого требуется подключение дополнительных моделей равновесного распределения размеров (Population Balance Model, PBM), затратных с вычислительной точки зрения. Недостатком модели DPM является ограничение на локальную объемную концентрацию частиц (менее 10%).

Все модели, и Лагранжевы и Эйлеровы, включают в себя большое число подмоделей для описания межфазного взаимодействия: модели силового взаимодействия, модели теплообмена, модели массообмена. Наборы этих подмоделей для Лагранжевых и Эйлеровых моделей отличаются. Например, в рамках модели DPM нельзя

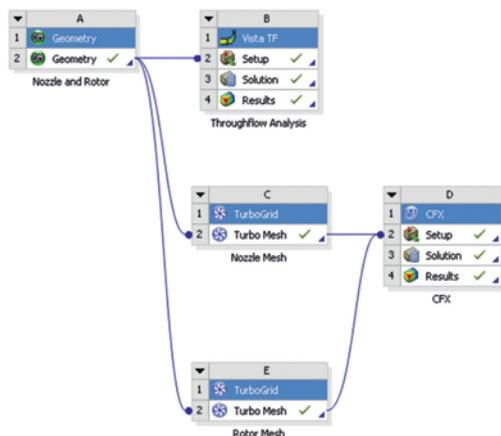
учесть составляющую боковой силы, зависящую от расстояния от стенки (т. н. «силу пристеночного смазывания», wall lubrication force). В то же время в рамках Эйлеровой модели нельзя учесть, например, силу термофореза, действующую на малые частицы при наличии большого градиента температуры в несущей фазе.

Для Эйлеровых моделей Mixture и Eulerian имеется больше подмоделей межфазного массообмена (фазовых переходов). Подмодели кипения, конденсации и испарения, а так же межфазных химических реакций, включая горение, доступны как для Эйлеровых, так и для Лагранжевых моделей, но сформулированы они по-разному и предназначены для описания разных физических явлений.

Для Эйлеровых моделей ключевым фактором при кипении и испарении/конденсации является разность температур (температуры вторичной фазы и критической температуры), в то время как для Лагранжевых — разность давлений (парциального давления выкипающего или испаряющегося компонента у поверхности частицы вторичной фазы и критического давления).

Возможности моделирования многофазных течений постоянно расширяются. Это расширение идет по двум основным направлениям. Первое связано с введением новых корреляций для различных межфазных взаимодействий. Например, отдельные специфические корреляции для теплообмена между сплошной средой и каплями, и сплошной средой и твердыми частицами, вместо одной универсальной корреляции.

Второе направление связано с возможностью совместного использования различных моделей и подмоделей, например,



Схематика проекта для расчета осевой турбины с использованием ANSYS Vista TF и ANSYS CFX

возможность учета кипения в рамках моделей равновесного распределения размеров пузырьков.

## Турбомашины

ANSYS CFD занимает лидирующие позиции на рынке программного обеспечения для турбомашиностроительной отрасли, которая предъявляет самые высокие требования к программному обеспечению с точки зрения точности, надежности и скорости проведения расчетов. Более чем двадцатилетний опыт использования ANSYS CFD в моделировании течения в турбомашине доказал его удобство, надежность и точность при расчете всех типов насосов, вентиляторов, компрессоров, газовых, паровых и гидравлических турбин.

В дополнение к ANSYS CFD в линейке программных продуктов ANSYS, Inc. имеется целый набор специализированных инструментов для проектирования и расчета турбомашин: модуль для 2D экспресс-анализа течения в проточной части ANSYS Vista TF; геометрический модуль для лопаточных аппаратов ANSYS BladeModeler, включая модули одномерного проектирования ANSYS Vista; автоматический сеточный генератор ANSYS TurboGrid.

Приложения ANSYS, Inc. для турбомашин разработаны ведущими мировыми экспертами в этой области, при этом все обширные экспертные знания турбомашин интегрированы в легкую в использовании расчетную платформу ANSYS Workbench.

Использование в рамках Workbench ANSYS Mechanical совместно с ANSYS CFD дает возможность решения междисциплинарных задач таких как, задачи аэропру-

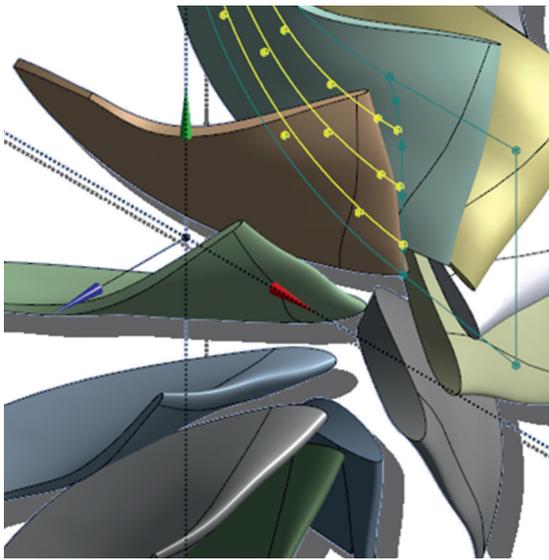
гости или расчет температурного состояния охлаждаемых лопаток. Подобная интеграция также дает все преимущества параметрического моделирования, что значительно упрощает процедуру проведения многовариантных расчетов. При этом на любом этапе проектирования к рабочему проекту можно подключить модуль параметрической оптимизации ANSYS DesignXplorer для автоматического нахождения оптимального варианта конструкции.

### Удобная работа с геометрией турбомашин

ANSYS BladeModeler — специализированный инструмент для работы с геометрией лопаточных аппаратов. Используя ANSYS BladeModeler вы можете «с нуля» построить 3D-модель турбомашин или импортировать геометрию из стороннего CAD-комплекса, например, Unigraphics, SolidWorks и др.

В первом случае трехмерная геометрия турбомашин строится на основе скелетной геометрии, т. е. через плоские профили в контрольных сечениях по ее высоте и меридиональные обводы. Скелетная геометрия может быть задана пользователем или получена с помощью 1D проектирования. Во втором случае твердотельная модель лопатки импортируется в ANSYS посредством таких форматов как IGES, Parasolid, или без промежуточной конвертации при наличии прямого интерфейса к CAD.

Широкий функционал общего геометрического модуля ANSYS DesignModeler позволяет строить геометрию вспомогательных устройств, например, улиток, диффузоров, подводящих патрубков, а также



Трехмерная геометрическая модель центробежного компрессора, построенная в ANSYS BladeModeler

нестандартную геометрию твердотельных лопаток и межлопаточных каналов, например, для лопаток с внутренними каналами охлаждения, бандажными полками, хвостовиками и т. д.

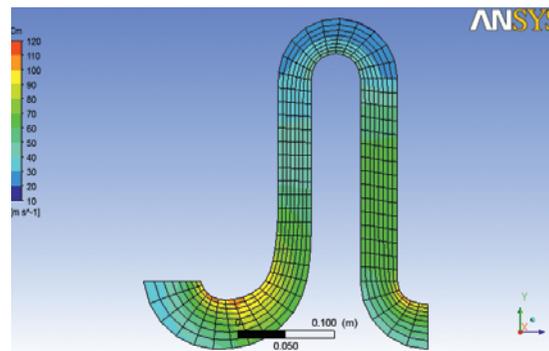
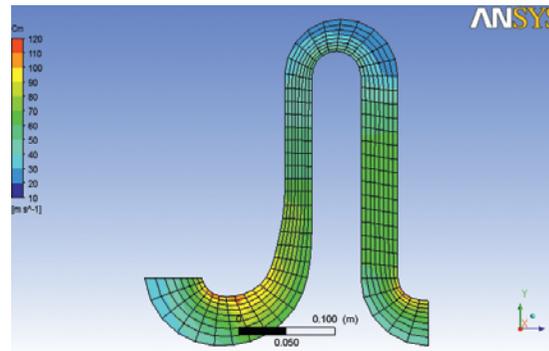
### Корректировка геометрической модели турбомашины

На начальном этапе проектирования геометрическая модель турбомашины может быть скорректирована на основе экспресс-анализа течения в проточной части с помощью ANSYS Vista TF. ANSYS Vista TF позволяет быстро оценить интегральные характеристики потока и предсказать основные тенденции течения в меридиональной плоскости. С ее помощью можно быстро прорчитать множество вариантов конструкции и внести необходимые поправки в геометрическую модель до проведения детального 3D CFD моделирования.

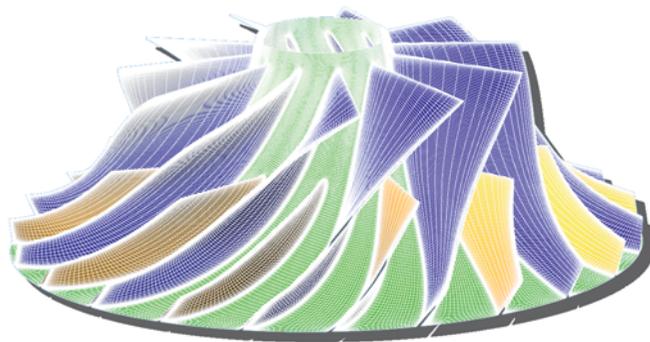
### Автоматическое построение сетки

Использование высококачественных гексагональных сеток при моделировании течения в проточных частях турбомашин позволяет существенно повысить точность и эффективность расчетов. Гексагональная сетка значительно экономичнее тетраэдральной с точки зрения вычислительных ресурсов. А структура сеточных линий как правило такова, что они оказываются направлены вдоль линий тока, что снижает ошибку при дискретизации уравнений.

Сеточный генератор ANSYS TurboGrid позволяет в автоматическом режиме создавать гексагональную сетку в межлопаточных каналах для всех типов турбомашин, включая колеса со сплиттерными лопатками, двухрядные решетки и т. д. Геометрия межлопаточного канала стро-



Геометрическая модель центробежного компрессора до и после корректировки по результатам расчета в ANSYS Vista TF. В результате сужения канала на выходе из колеса застойная зона пониженной скорости, где велика вероятность отрыва, уменьшена. Распределение меридиональной проекции скорости в проточной части центробежного компрессора до корректировки геометрии (А). Распределение меридиональной проекции скорости в проточной части центробежного компрессора после корректировки геометрии (Б)



Построенная в ANSYS TurboGrid гексагональная сетка в колесе со сплиттером

ится автоматически на основе данных, полученных из ANSYS BladeModeler. При этом обеспечивается совпадение интерфейсных границ между разными венцами в многоступенчатых турбомашинах.

Широкий набор готовых автоматических шаблонов ANSYS TurboGrid гарантирует высокое качество сетки на выходе при минимальных настройках пользователя. Таким образом, вы можете строить гексагональные сетки высокого качества за минимальное время.

Для создания расчетной сетки во вспомогательных устройствах, например, улитках, диффузорах, подводящих патрубках, а также разбиения расчетной области, включающей, например, каналы охлажде-

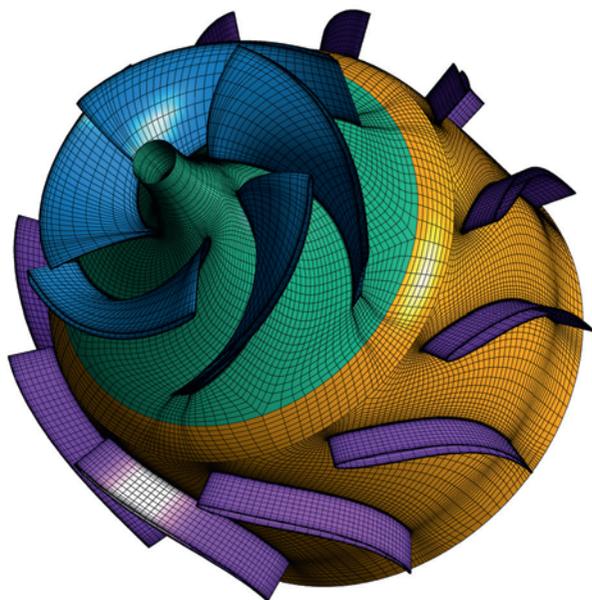
ния или надбандажные уплотнения, можно использовать автоматический сеточный генератор ANSYS Meshing.

### Вращающиеся машины в ANSYS CFD

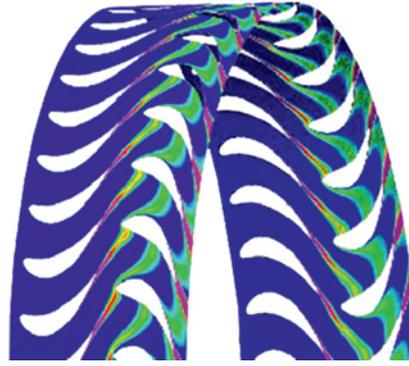
Для моделирования течения во вращающихся машинах в ANSYS CFD реализована возможность расчета каждого венца в собственной системе координат. При этом в рассмотрение могут быть взяты только один или несколько межлопаточных каналов каждого венца с заданием условия окружной периодичности. Широкий набор специальных моделей для передачи граничных условий на границе между подвижной и неподвижной областями турбомашин позволяет выбрать оптимальный путь моделирования с точки зрения точности решения и затрат ресурсов.

Модели нестационарного взаимодействия между ротором и статором позволяют напрямую моделировать нестационарное взаимодействие для получения максимально точной и реалистичной картины течения.

Реализованные в ANSYS CFX модели Transient Blade Row, в основе которых лежат преобразование по времени и преобразование Фурье, позволяют учитывать нестационарное взаимодействие между неподвижным и вращающимся венцами без рассмотрения всего колеса в 360°. В рамках одного расчета можно комбинировать как стационарные, так и нестационарные модели взаимодействия ротор-статор. Модели Transient Blade Row открывают новые перспективы для моделирования таких сложных явлений как «клокинг эффект», решения задачи флаттера и т. п.



Построенная в ANSYS TurboGrid гексагональная сетка для диагонального насоса



Модели Transient Blade Row в ANSYS CFX позволяют значительно сэкономить вычислительные ресурсы и точно восстановить нестационарную картину течения в турбомашине, учесть эффекты взаимодействия ротора и статора. На рисунке изображено мгновенное распределение энтропии в межлопаточном канале турбины осевой турбины: А — распределение для всего кольца восстановлено по результатам расчета методом преобразования по времени течения в одном межлопаточном канале; Б — распределение получено из расчета течения во всей турбине 360°

Простая стационарная модель Stage, в основе которой лежит принцип окружного осреднения параметров на границе ротор-статор с последующей передачей осредненного профиля вниз по потоку, позволяет проводить сквозные расчеты многоступенчатых турбомашин. С ее помощью можно получить решение быстро и при этом не брать в рассмотрение всё колесо в 360° (даже при разном числе лопаток в венцах). Однако с помощью этой модели невозможно учесть ни нестационарное взаимодействие ротор-статор, ни окружную неравномерность параметров. Тем не менее, модель Stage зарекомендовала себя как удобная, быстрая, экономная с точки зрения затрачиваемых ресурсов и относительно точная, поэтому вполне заслуженно остается популярной и широко употребляемой на практике.

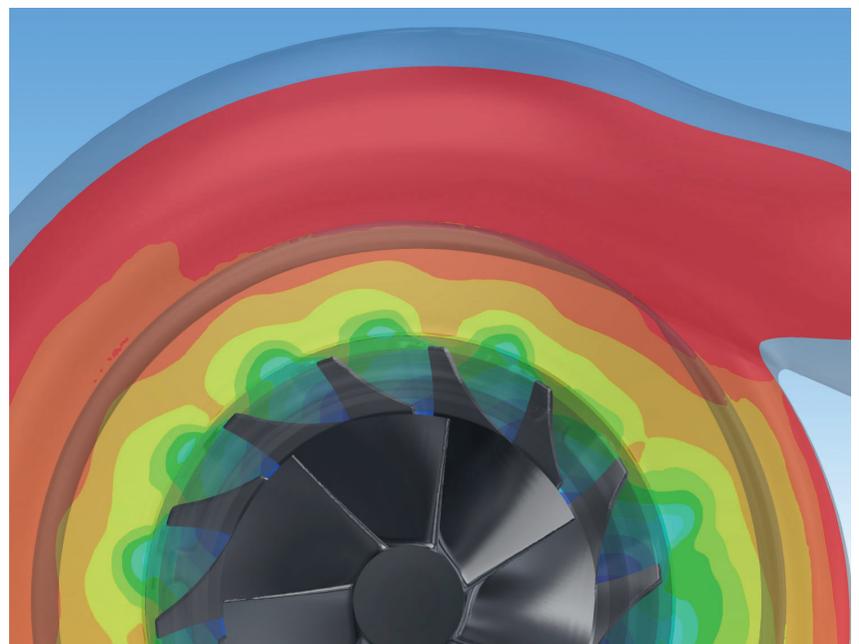
Другой путь моделирования взаимодействия между неподвижными и вращающимися компонентами турбомашин — это использование модели «Замороженное колесо». Она может быть полезна в случаях, когда необходимо учесть неравномерность параметров в окружном направлении. Например, в случае наличия неосесимметричной улитки перед рабочим колесом турбомшины. Модель «Замороженное колесо» позволяет проводить квазистационарные расчеты, при котором положение ротора и статора остаются фиксированными друг относительно друга. Специальный алгоритм в ANSYS CFX позволяет немного вытягивать распределения параметров в окружном направлении, тем самым давая возможность не строго выдерживать соответствие интерфейсных границ в окружном направлении в роторе и статоре. Результаты таких рас-

четов могут быть использованы в качестве начального приближения для нестационарного расчета.

### Автоматизированный пре- и постпроцессинг

Разработанные специально для задач расчета течения в турбомашине инструменты пре- и постпроцессинга ANSYS позволяют значительно упростить процесс проведения расчетов.

В рамках ANSYS CFX реализован специализированный Turbo препроцессор для упрощенной постановки задачи моделирования течения в межлопаточных каналах турбомашин, что упрощает процесс задания необходимых настроек.



Для моделирования окружной неравномерности от спиральной камеры в центробежном колесе применялась модель «Замороженное колесо»

Встроенный в CFD-Post постпроцессор Turbo позволяет обрабатывать и представлять результаты расчета в привычном для инженеров-турбомашинистов виде: выводить значения рассчитываемых переменных в меридиональном сечении, в поперечном сечении межлопаточных каналов, по радиусу, по обводу профиля. С его помощью можно представить графики распределения параметров от входа к выходу турбомшины, от втулки к периферии или по профилю лопатки. Также в CFD-Post можно создавать структурированные отчеты, содержащие все исходные данные и основные параметры турбомшины. Данный отчет можно сохранить в формате HTML.

С помощью CFD-Post также визуализируются и обрабатываются результаты расчета в ANSYS Vista TF.

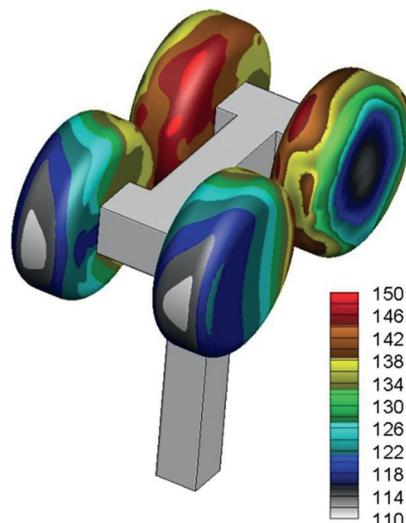
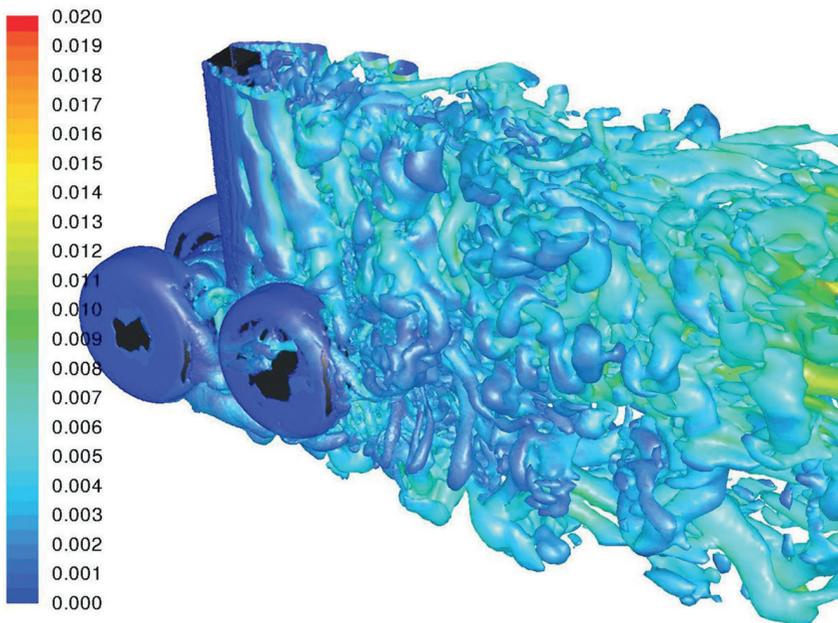
## Акустика

В настоящее время численное моделирование задач аэроакустики становится особенно актуальным для авиационной и двигателестроительной отраслей. Это связано в первую очередь с введением ограничений на эксплуатацию наиболее шумных самолетов. С другой стороны, интенсивный рост производительности современных вычислительных систем позволяет заменить в отдельных случаях дорогостоящие эксперименты более дешевыми численными экспериментами.

В задачах аэроакустики используются два подхода: прямой и интегральный. Первый метод характеризуется большой трудоемкостью и требует использования не только численных алгоритмов высокой точности, в частности, схем высокого порядка, по пространству и времени, но и подробных сеток большой размерности (от 25 до 40 узлов на наименьшую длину волны). Это приводит к необходимости применения распределенных вычислений.

Интегральный подход состоит из двух этапов: на первом этапе выполняется нестационарный гидродинамический расчет, и вся информация о характеристиках потока (плотности, давлении, компонентах скорости) сохраняется на так называемых контрольных поверхностях. Далее с помощью соответствующих интегральных формул выполняется расчет распространения звука до точки наблюдателя. В ANSYS CFD реализован интегральный метод Фокса Вильямса-Хокинга (Ffowcs Williams & Hawkings). Вся обработка данных с контрольных поверхностей выполняется специальным акустическим постпроцессором, который позволяет получить зависимость акустического давления от времени в заданных точках наблюдателя. Эти зависимости можно преобразовать в частотный спектр с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT). В целом акустические аналогии Фокса Вильямса и Хокинга могут быть использованы для расчета шума от различных объектов, начиная от шума газовых струй, лопаток вентиляторов и гребных винтов, до шума автомобиля и самолета.

Модели источника широкополосного шума (Broadband Noise Source Models) в ANSYS Fluent позволяют оценить мощность источника звука, основываясь на результатах моделирования в стационарной постановке.



## Деформируемые и подвижные сетки

Существует огромное количество инженерных задач, связанных с поступательным и вращательным движением твёрдых тел, а также с деформацией исследуемых тел и граничных поверхностей. Отклонение рулевых поверхностей, вращение лопаточных машин, моделирование работы шестерёнчатых мембранных и поршневых насосов, а также ДВС — вот лишь несколько примеров подобных задач. Все они могут быть легко решены в ANSYS CFD с помощью технологии динамических перестраиваемых расчётных сеток, то есть сеток, изменяющихся непосредственно в процессе расчёта.

Известно три основных метода перестроения расчётной сетки. Первый метод — метод Smoothing (сглаживание). При его использовании количество ячеек всегда остаётся постоянным, однако узлы сетки двигаются по определённому закону, что приводит к деформации ячеек. Этот метод наиболее часто применяется при моделировании колебаний тел вблизи центра равновесия, а также при моделировании поворота тел на малые углы.

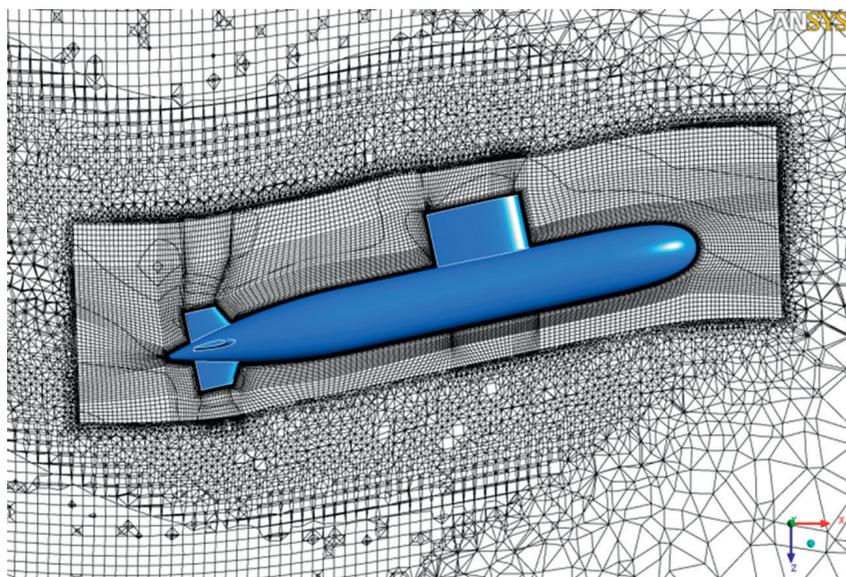
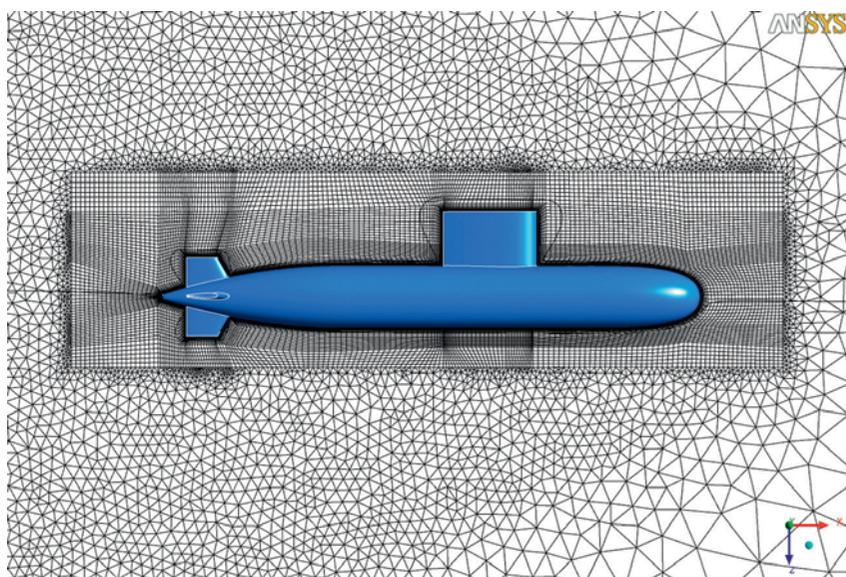
Для моделирования поступательного движения тела на большое расстояние или вращение на большие углы лучше применять метод Remeshing (перестроение). В этом случае узлы расчётной сетки остаются неподвижными, однако решатель постоянно проверяет параметры расчётных ячеек. В том случае, если после смещения тела в расчётной сетке появляется слишком большая ячейка, то в её центр добавляется новый узел, а ячейка разбивается на несколько новых ячеек меньшего объёма. И наоборот, если объёмы нескольких ячеек существенно уменьшаются, они объединяются в одну ячейку большего объёма. В результате количество ячеек в расчётной сетке постоянно меняется. Следует отметить, что метод Remeshing может применяться в сочетании с методом Smoothing, что позволяет моделировать любое по сложности и амплитуде движение исследуемого тела в расчётной области.

Если требуется смоделировать поступательное движение тела в цилиндрическом канале (поршень в цилиндре, снаряд в канале ствола) целесообразно воспользоваться методом Layering (генерация слоёв), который достраивает расчётную сетку слоями в соответствии с движением исследуемого тела. В результате получается

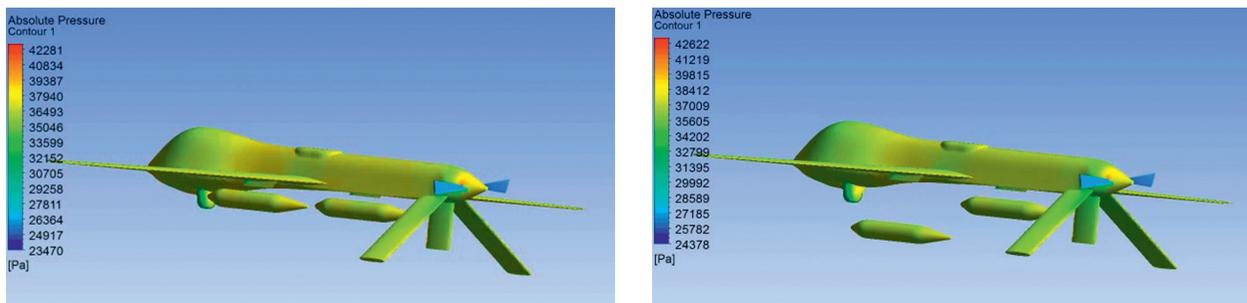
расчётная сетка, состоящая из слоёв ортогональных призм заданной толщины. Количество ячеек в такой расчётной сетке также постоянно меняется.

Все выше описанные методы в полной мере представлены в программном продукте ANSYS Fluent. При этом пользователь имеет широкие возможности по настройке алгоритмов перестроения: целый ряд параметров может быть изменён с целью достижения максимального качества расчётной сетки.

В ANSYS CFX отсутствует метод Layering, а перестроение сетки осуществляется посредством внешних сеточных препроцессоров, ANSYS ICEM CFD или ANSYS Meshing. Кроме того, в ANSYS CFX реализован метод «погруженного тела», основанный на методе суперпозиции сеток, ко-



Пример моделирования всплытия подводной лодки с использованием технологии деформируемой сетки



Пример использования 6DOF решателя ANSYS Fluent

торый позволяет напрямую моделировать задачи с 6DOF без перестроения расчетной сетки.

В обоих программных комплексах, ANSYS Fluent и ANSYS CFX, может быть смоделировано вынужденное движение твёрдого тела, свободное движение тела, имеющего массо-моментные характеристики, а также деформация поверхности тела. Для каждого из этих случаев в программном комплексе ANSYS Fluent должна быть написана пользовательская функция на языке программирования C, которая компилируется и подключается к расчёту. В программном комплексе ANSYS CFX все законы движения тел или их массо-моментные характеристики описываются с помощью языка скриптов CCL.

Для моделирования вращения тела относительно заданной оси в ANSYS Fluent можно использовать метод скользящих сеток (Sliding). В этом случае сеточная зона (ротор) совершает вращение, относительно неподвижной зоны (статора). При этом одна сетка, не деформируясь, проскальзывает относительно другой. На стыке двух сеток возникает неконформный интерфейс, и параметры потока пересчитываются с помощью одного из методов интерполяции. О том, как данная технология реализована в ANSYS CFX, вы можете подробно прочесть в разделе **Турбомашинны**.

Следует отметить, что технологии динамических перестраиваемых расчётных сеток и скользящих сеток совместимы со всеми моделями турбулентности, свойствами материалов, а также с моделями многофазных течений и теплообмена.

Разработчики программного комплекса ANSYS постоянно совершенствуют техно-

логии перестроения расчётных сеток, а также алгоритмы интерполяции данных через неконформные интерфейсы. В новой версии 15.0 продукта ANSYS Fluent методы Smoothing и Remeshing теперь работают более устойчиво при приближении исследуемого тела к границе расчётной области. В ANSYS CFX были изменены настройки решателя с целью получения достоверного решения на сильно скошенных и сильно вытянутых ячейках, а также введена поддержка анизотропной «жесткости» сетки.

## Междисциплинарные расчеты

Расчеты взаимодействия потока жидкости с конструкцией встречаются во многих инженерных приложениях. Например, в нефтегазовой отрасли актуальной является задача расчета вибраций отдельных элементов конструкций морских буровых платформ, возбуждаемых потоком жидкости вследствие отрыва вихрей от поверхности этих объектов (так называемое вихревое возбуждение). В авиационной отрасли и турбомашиностроении к этому классу проблем относятся задачи о динамической неустойчивости, когда малые внешние возмущения в потоке, носящие случайный характер, могут вызвать сильные колебания конструкции. Например, флаттер лопаток турбины или флаттер крыла самолета.

Аэроупругие колебания могут быть обусловлены и периодическим срывом вихрей. Частота срыва вихрей зависит от формы тела и скорости набегающего по-

тока. Если частота близка к собственным частотам тела, то возникает механический резонанс и происходит разрушение конструкции. Классическим примером реализации подобных сценариев является разрушение Такомского моста в ноябре 1940 года.

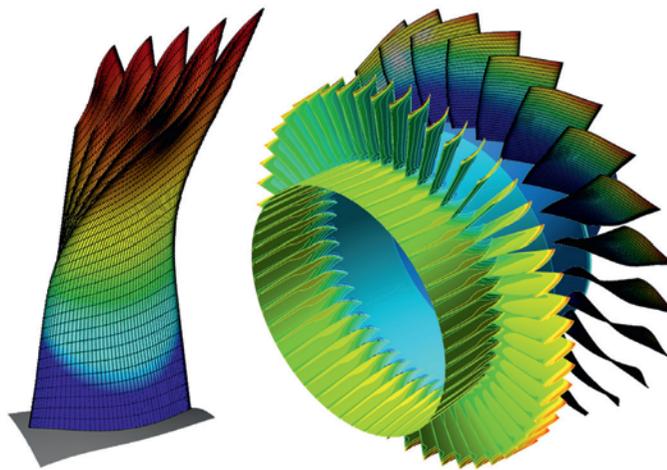
Программный комплекс ANSYS имеет в своём составе комплексные технологии, позволяющие решать подобные задачи и создавать изделия, в полной мере удовлетворяющие запросам заказчика. Примером такой технологии является технология решения многодисциплинарных задач (Fluid-Structure-Interaction, FSI), которая позволяет определять напряжённо-деформированное состояние (НДС) конструкции на основе нагрузок, возникающих при обтекании тела потоком жидкости или газа. Эта технология реализована в рамках расчетной среды ANSYS Workbench, которая позволяет передавать результаты расчётов, относящихся к разным областям физики.

Различают два вида технологии FSI: одностороннее взаимодействие и двустороннее взаимодействие.

В рамках технологии одностороннего FSI возможно моделирование влияния потока жидкой среды на конструкцию. Результаты газодинамического расчёта передаются в одном направлении: от CFD-решателя в прочностной решатель, после чего они используются в качестве граничных условий при расчёте НДС твёрдого тела. Таким образом учитывается только влияние потока жидкости на НДС твёрдого тела, и предполагается, что изменения формы твёрдого тела настолько малы, что не оказывают существенного влияния на поле потока.

При использовании технологии одностороннего FSI могут быть переданы не только газодинамические, но и термические/тепловые нагрузки. При этом будут учтены механические и температурные деформации исследуемой конструкции.

Если при расчете конструкции необходимо одновременно учесть механические и термические нагрузки, пользователь может использовать два метода. Первый вариант – смоделировать поле потока жидкости с помощью CFD-решателя, а затем передать эпюру давления и поле температуры на поверхности твёрдого тела в качестве граничного условия в ANSYS Mechanical. В этом случае поле температуры внутри твёрдого тела будет вычисляться в приложении Steady-State Thermal (при стационарном расчёте), или в приложении



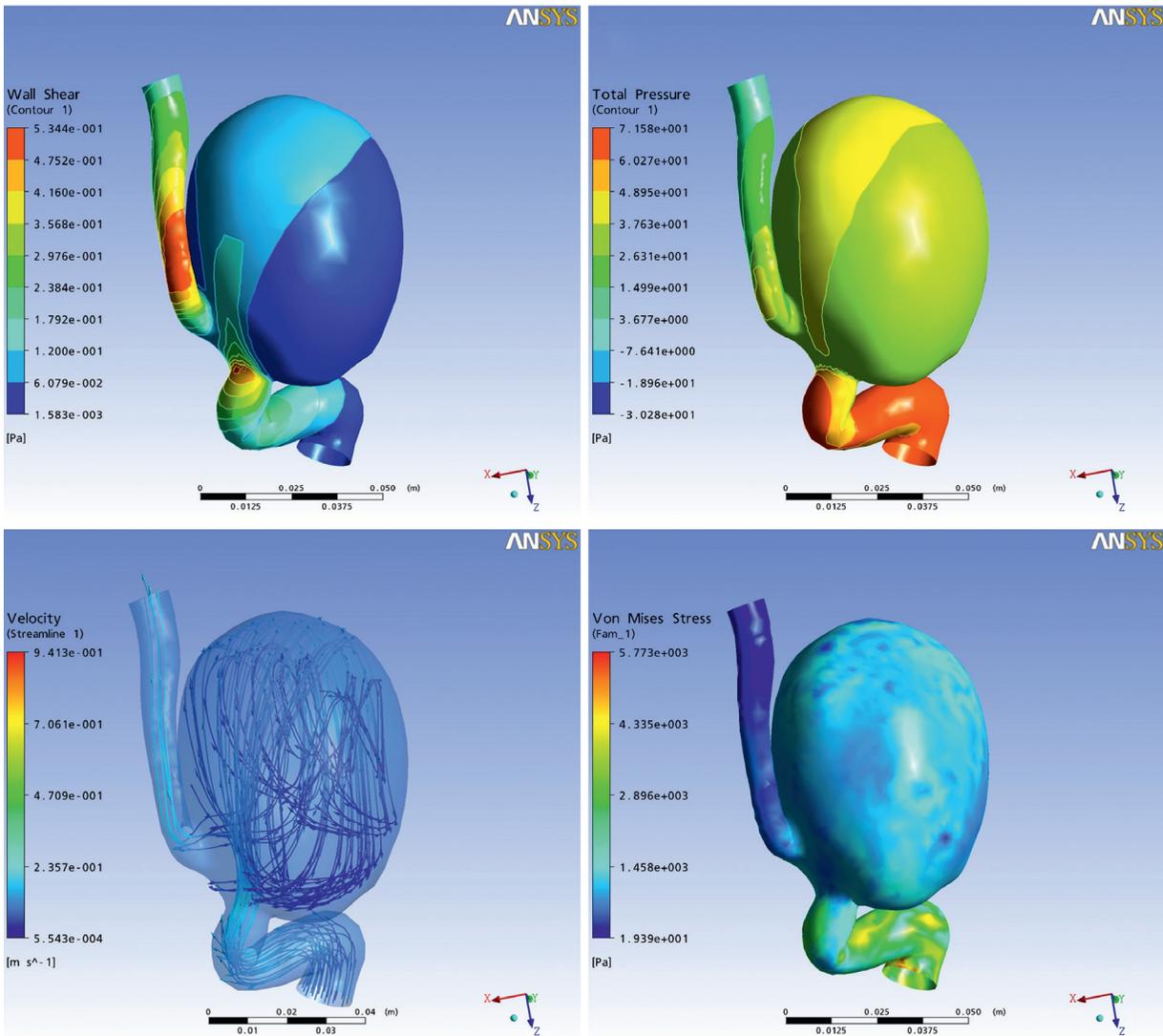
Пример использования FSI технологий ANSYS при проектировании высоконагруженной ступени трансзвукового осевого компрессора

Transient Thermal (при нестационарном расчёте). После этого неравномерное поле температур внутри тела может быть передано в качестве начального условия в приложение Static Structural или Transient Structural для расчёта термо-напряжённого состояния конструкции.

Во втором случае пользователь может рассчитать температурное состояние конструкции с помощью средств CFD-решателя. Для этого необходимо построить расчётную сетку не только в области течения, но и внутри исследуемого тела, а затем в решателе задать настройки для твёрдой сеточной зоны, и решить задачу сопряжённого теплообмена (с учетом теплопроводности твёрдого тела). В этом случае поле температур внутри всего тела (объёмное распределение) передаётся непосредственно в приложение Static Structural или Transient Structural для расчёта НДС исследуемого тела.

Следует отметить, что в общем случае построение расчётных сеток для газодинамического, температурного и прочностного расчётов основано на разных принципах. То есть узлы расчётной сетки для газодинамического расчёта на поверхности и внутри твёрдого тела не будут совпадать с узлами расчётной сетки для прочностного расчёта. По этой причине при использовании технологии FSI применяется интерполятор, который передаёт данные между решателями, основываясь на положении узлов каждой сетки в глобальной системе координат.

Технология одностороннего FSI реализована таким образом, что не имеет принципиальных отличий при использовании решателей ANSYS CFX или ANSYS Fluent.



### Использование FSI при моделировании аневризмы восходящего отдела аорты

В том случае, если у вас уже есть результаты расчетов, полученные в старой версии CFD-решателей, с помощью сторонней программы, или с помощью экспериментальных методов, вы можете импортировать их в ANSYS Mechanical с помощью специального приложения External Data. Это приложение позволяет загружать в «прочностной» расчёт данные из текстового файла. При этом совершенно не важно, каким именно способом был получен текстовой файл, так как имеется возможность явно указать, какие данные содержатся в каждом столбце текстового файла и к какой граничной поверхности их следует прикладывать.

Если деформации конструкции способны значительно изменить поле потока, использование технологии одностороннего FSI может привести к получению недо-

верных результатов. В этом случае целесообразно применять технологию двустороннего FSI, в рамках которой рассматривается влияние жидкости на конструкцию, а также влияние изменения формы конструкции на поле потока. Данные на каждом шаге по времени передаются в прямом направлении – от CFD-решателя в прочностной решатель, и в обратном направлении – от «прочностного» решателя в CFD.

Следует отметить, что в расчётной платформе ANSYS Workbench технология двустороннего FSI для решателей ANSYS CFX и ANSYS Fluent реализована по-разному. Связывание ANSYS CFX с ANSYS Mechanical происходит посредством решателя ANSYS MultiField, а связывание ANSYS Fluent с ANSYS Mechanical происходит через приложение ANSYS System Coupling.

**Компания Parker Aerospace использует программное обеспечение ANSYS, чтобы сократить затраты и время выхода новых авиационных комплексов.**

По мере того, как работа самолетов становится эффективнее, надежнее и безопаснее, их конструкция усложняется. В связи с этим, применение компьютерного моделирования становится неотъемлемой частью процесса проектирования новых самолетов. Проектирование сложных систем требует понимания работы всех подсистем и компонентов. Хотя инженеры могут получить данные о работе компонентов с помощью эксперимента, такой подход может быть чрезвычайно дорогостоящим в связи с тем, что область рабочих режимов постоянно увеличивается (включая давление на входе, расход, высоту и др.).

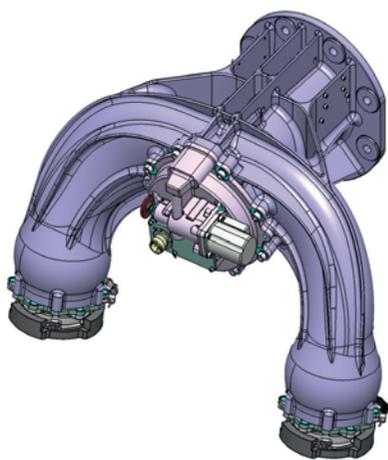
Для анализа и оценки работы компонентов в рамках одной системы, специалисты инженерного отдела компании Parker Aerospace используют ANSYS CFX для расчета гидрогазодинамики и ANSYS Icerak для анализа теплового состояния компонентов. Такой подход помогает компании сократить затраты, время разработки, а также повысить надежность компонентов.

Компания Parker Aerospace является мировым лидером в производстве систем управления летательными аппаратами, гидравлических систем, топливных систем, трубопроводных систем, инженерных систем и компонентов, которые используются практически во всех коммерческих и военных само-

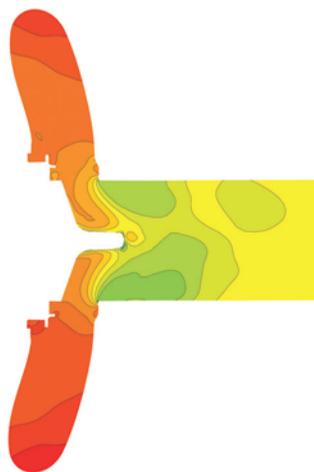
летах по всему миру, включая вертолеты, беспилотники, ракеты, а также другие высокотехнологические приложения.

Штуцер дозаправки, разработанный компанией Parker, напоминает часть реактивного ранца или костюма Железного Человека, однако, на самом деле, он контролирует процесс дозаправки одного из самых современных разрабатываемых самолетов. Это соединение состоит из двух отдельных заправляющих линий, соединяющихся в одном основном канале, расход в котором контролируется встроенным клапаном. Это является чрезвычайно важным для обеспечения безопасности и скорости заправки и слива топлива.

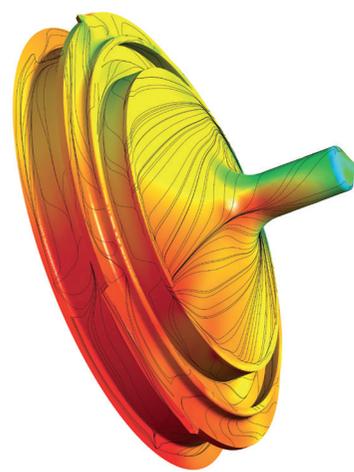
При расчете множества стационарных конфигураций (различные положения клапана) использовалась расчетная сетка, содержащая около 12 млн. расчетных элементов. В данных расчетах использовался программный комплекс ANSYS CFX для получения распределения давления на стенке с целью оптимизации положения контрольных точек давления. В данном изделии эти точки используются для контроля процесса закрытия и открытия клапана в главном канале. Экспериментально было определено общее падение давления в системе, что хорошо согласуется с результатами CFD-расчета. CFD-специалисты компании Parker также проводят связанные расчеты жидкость - твердое тело (FSI) для оценки динамических характеристик штуцера дозаправки при специфических условиях работы.



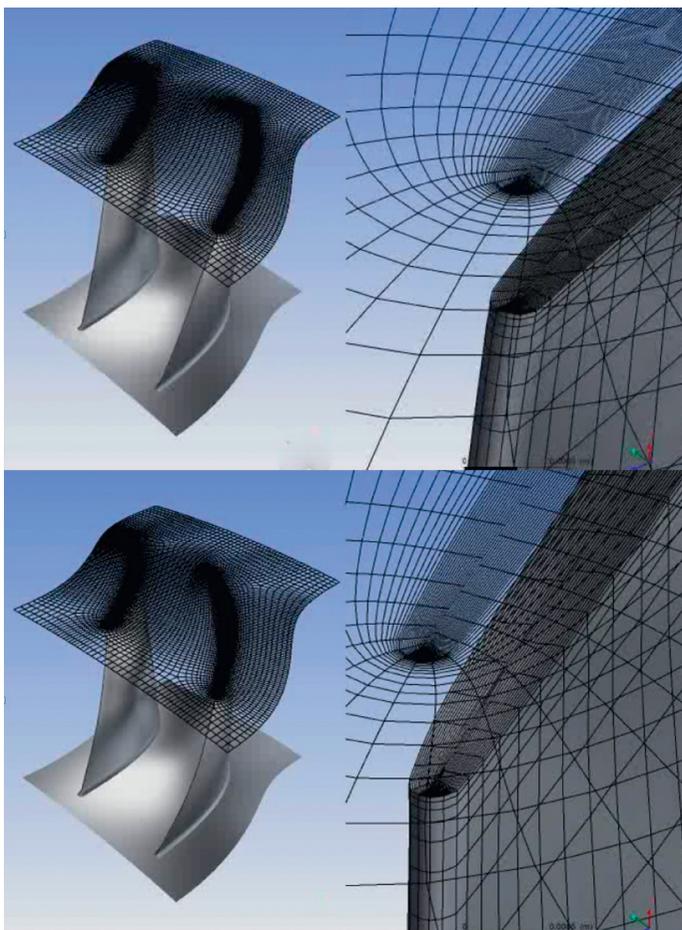
CAD-модель штуцера дозаправки



Контуры статического давления в двух сечениях



Линии тока и статического давления на основном клапане



Колебания верхней кромки лопатки увлекают за собой узлы сетки, расположенной в зазоре. Узлы на периферии скользят вдоль поверхности постоянного радиуса, обеспечивая минимальную скошенность элементов

Также как и в случае одностороннего FSI существует возможность передавать либо только газодинамические нагрузки на поверхности тела, либо одновременно газодинамические и термические нагрузки. Во втором случае вычисление поля температур внутри твёрдого тела осуществляется в решателе ANSYS Mechanical с применением междисциплинарных элементов.

До недавнего времени связь между ANSYS Fluent и ANSYS Mechanical была неполной, так как отсутствовала возможность одновременной передачи газодинамических и температурных нагрузок в рамках приложения System Coupling. Эта проблема была решена в текущей версии 15.0. Как и при использовании решателя ANSYS CFX, расчёт поля температур внутри тела происходит в ANSYS Mechanical с применением междисциплинарных элементов.

После определения деформаций, изменённая форма конструкции передаётся

обратно в CFD-решатель, где учитывается с помощью технологии динамической перестраиваемой сетки. Кроме деформаций в CFD-решатель также передаётся и поле температур на поверхности твёрдого тела, в результате появляется возможность учёта влияния нагретого тела на поток жидкой среды

В версии 15.0 в ANSYS CFX появилась дополнительная опция, относящаяся к задачам турбомашиностроения, которая существенно повышает стабильность расчетов при деформации сеточной структуры — это т. н. режим свободного скольжения вдоль поверхности расчёта (Constrained to Surface of Revolution). Пользователь самостоятельно задаёт положение и ориентацию оси вращения для поверхности вращения. Узлы внешней границы могут скользить вдоль поверхности, определяемой через ось и радиальный профиль исходной поверхностной сетки. При этом, что важно, сохраняется радиальное положение узлов при окружных перемещениях. Данная технология успешно применяется, например, при расчёте на флаттер (типичная FSI-задача) лопаток турбомашин.

В заключение отметим, что при использовании технологии FSI пользователь получает возможность в полной мере использовать все модели решателей ANSYS CFD и ANSYS Mechanical, так как при решении FSI-задачи происходит лишь передача данных между решателями, при этом функционал каждого из них сохраняется в полном объёме.

## Постпроцессинг

Одним из важнейших этапов CFD-моделирования является анализ результатов. Для визуализации полученных результатов необходим постпроцессор, он позволяет пользователю понять характер и особенности течения в конструкции. Комплекс ANSYS® CFD-Post™ является общим постпроцессором для всех гидрогазодинамических кодов ANSYS.

Комплекс ANSYS CFD-Post обладает современным и интуитивным пользовательским интерфейсом и позволяет создавать высококачественные иллюстрации полевых величин с любым уровнем детализации.

Представление количественной информации является важнейшей частью комплекса ANSYS CFD-Post. Благодаря встроенным возможностям постпроцес-

сора пользователь может оперативно получить любую необходимую количественную информацию: средневзвешенные данные, массовый расход, силы, максимальные/минимальные значения и множество других возможностей. В комплексе существуют возможности отображения табличных данных, построения графиков, создания автоматических отчетов, а также использования специализированных инструментов для анализа параметров турбомашин.

Не менее важным аспектом является автоматизация процесса. Пользователь может с легкостью создать макрос, например, записать интерактивные действия в файл сессии, с последующей возможностью повторного выполнения в подобных задачах.

Важной особенностью ANSYS CFD-Post является возможность работы в пакетном режиме, что, в свою очередь, позволит автоматизировать процессы и интегрировать его в цикл оптимизации.

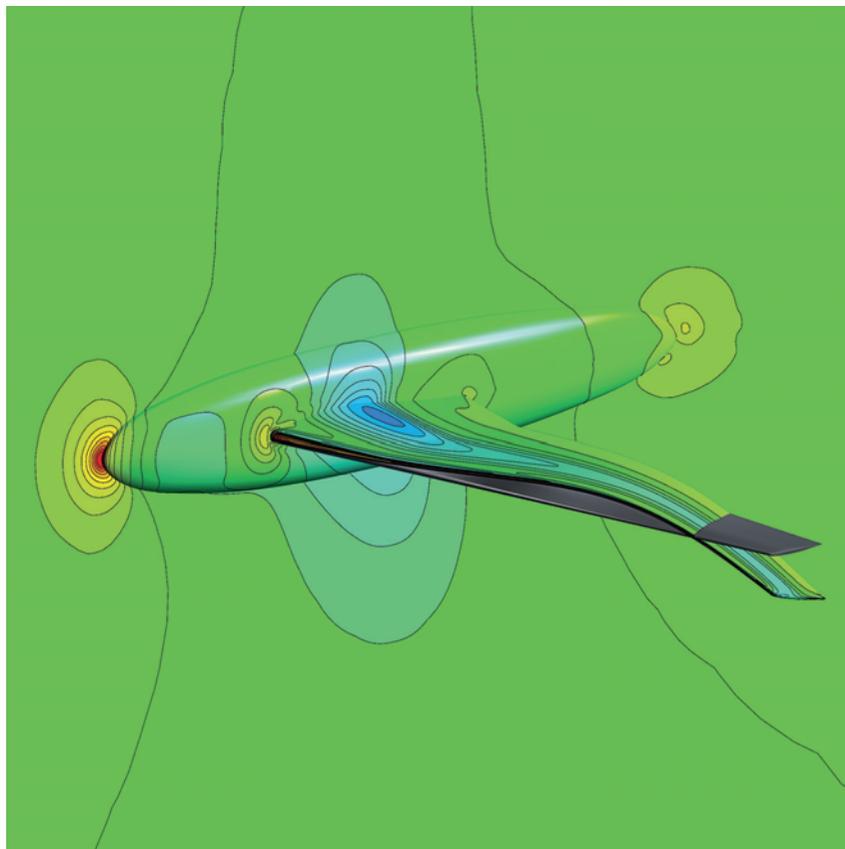
Кроме обычного двумерного отображения результатов расчетов ANSYS CFD-Post позволяет сохранять и отображать результаты в трехмерном виде. Такие изображения можно просматривать с помощью бесплатного приложения CFD-Viewer. Более того, существует возможность встраивать такие трехмерные изображения в Microsoft® PowerPoint®, что значительно повышает информативность презентации.

Комплекс ANSYS CFD-Post позволяет анализировать одновременно несколько расчетов, т. е. выполнять сравнительный анализ результатов моделирования. Результаты FSI-расчета также могут сравниваться одновременно, с синхронизацией шага по времени для нестационарных расчетов.

Каждая сессия в ANSYS CFD-Post включает создание отчета на основе стандартного шаблона. Отчеты автоматически обновляются с новыми результатами расчета. Итоговый отчет может быть преобразован в формат HTML.

Благодаря использованию анимации, полученные CFD-результаты выглядят более динамичными и презентабельными.

Постпроцессор ANSYS CFD-Post содержит большой спектр функций для выполнения операций над результатами расчета, в том числе для получения интегральных характеристик. Подобные операции можно реализовать с использованием языка выражений CEL, являющегося неотъемлемой частью комплекса.



Пример визуализации результатов CFD-расчета и результатов модального анализа (формы колебаний) в одном графическом окне (рамках одной сессии CFD-Post)

## Высокопроизводительные вычисления

Программный комплекс ANSYS CFD прекрасно масштабируется; могут использоваться как многопроцессорные, так и кластерные системы. Технология динамической балансировки автоматически отслеживает и анализирует производительность параллельного счета, при этом происходит перераспределение расчетных элементов между процессорами так, чтобы сбалансировать нагрузку на процессоры при использовании даже сложных физических моделей. Однако есть ограниченный список задач и физических моделей, которые балансируются достаточно сложно. К подобным моделям относятся DPM модели, модель VOF, отдельные модели лучистого теплообмена (излучения).

В версии 15.0 решатель ANSYS CFX показывает линейную масштабируемость производительности до 2048 ядер. Реша-

таль ANSYS Fluent демонстрирует следующие показатели: его производительность не падает до 4096 ядер; при увеличении числа ядер вдвое (до 8192) производительность может составлять 70-90% от «идеальной» (в зависимости от типа задачи, размерности сетки, топологии сети/интерконнекта и пр.).

Достаточно впечатляющими выглядят результаты, полученные при моделировании горелочного устройства DLR в ANSYS Fluent 15.0: для сетки размерностью 96

млн. ячеек в нестационарной задаче производительность на 10240 ядрах составила 84%, на 14336 ядрах – 79%.

Также следует отметить, что решатели ANSYS Fluent позволяют проводить расчеты на гибридных вычислительных системах (CPU+GPU) с использованием графических процессоров NVIDIA.

Дополнительную информацию о параллельных вычислениях (HPC) вы можете получить в нашем каталоге «Комплексные решения».

## Сводные таблицы применимости продуктов

**Таблица 1. Позиционирование сеточных препроцессоров ANSYS по отраслям**

Отрасль	Авиация, автомобилестроение	Нефтегазовая отрасль, атомная энергетика	Строительство, металлургия	Аэрокосмос; турбомашиностроение; двигателестроение
Качество геометрии	Низкое	Умеренно низкое	Среднее	Хорошее
Комплексность геометрии (кол-во элементов в сборке)	>1000	100...1000	~100	<100
	Fluent Meshing		ANSYS ICEM CFD	
	ANSYS Meshing			

**Таблица 2. Возможности CFD-продуктов, отрасли и перечень решаемых задач**

Отрасль	Возможности	Задачи и объекты
Авиация и космос	Сетки Турбулентность Теплообмен Горение Вращающиеся машины Акустика 6DOF FSI и связанные задачи	Внешняя аэродинамика (дозвуковые, трансзвуковые, сверхзвуковые и гиперзвуковые потоки); аэроакустика; горение (газообразное, жидкое, твердое топливо); абляция/эрозия; противообледенительные устройства/системы; температурное и термонапряженное состояние; флаттер крыльев; аэродинамические нагрузки на навесное оборудование и мн. др.
Турбомашиностроение	Сетки Турбулентность Многофазные потоки Вращающиеся машины Акустика FSI и связанные задачи	Течения в проточной части турбин, компрессоров, насосов; диффузор, выхлопной тракт, уплотнения; горелочные устройства/камеры сгорания; контроль загрязняющих выбросов; аэроакустика; флаттер лопаток; температурное состояние конструктивных элементов.
Атомная энергетика	Тепло- и массообмен Горение Многофазные потоки	Реакторы (ВВЭР, РБМК, БН и др.); тепловыделяющие сборки (ТВС); трубопроводы; парогенераторы; фильтры очистки; насосы; паровые турбины; корриум и пр.
Нефтегазовая отрасль	Многофазные потоки FSI и связанные задачи	Течения в трубопроводах. Сепарация нефти и газа. Расчет гидроудара. Расчет волновых нагрузок на морские сооружения. Гидродинамика танкеров. Моделирование взрывов и последствий ЧС (разлив нефти, взрыв газа)
Строительство	Турбулентность Теплообмен Горение FSI и связанные задачи	Анализ ветровых нагрузок; пожаробезопасность; распространение дыма; расчет вентиляции/отопления и пр.
Металлургия	Теплообмен Многофазные потоки	Литье; обжиг; плавление и затвердевание; индукционный нагрев; печи; переработка металлолома; вытяжка; закаливание и пр.

# Больше информации о программных продуктах ANSYS читайте в наших каталогах

## Механика деформируемого твердого тела



Обзор решений ANSYS для механики деформируемого твердого тела:

- Статические прочностные расчеты, динамические расчеты во временной и частотной области, тепловые расчеты, акустические расчеты, связанные расчеты, моделирование жидкости и газа, механика разрушения в ANSYS® Mechanical™
- Динамика абсолютно жестких тел в ANSYS® Rigid Body Dynamics®
- Расчеты высоконелинейных быстропотекающих высокоскоростных процессов в ANSYS® AUTODYN®, ANSYS® Explicit STR™ и ANSYS® LS-DYNA®
- Проведение динамических расчетов с использованием ANSYS® LS-DYNA® для Workbench
- Расчеты конструкций из композиционных материалов в ANSYS® Composite PrepPost™
- Расчеты усталостной долговечности в ANSYS® nCode DesignLife™ и ANSYS® Fatigue™

## Электромагнетизм



Решения ANSYS для моделирования электромагнитных полей и вычисления электрических параметров:

- Высокочастотное моделирование в ANSYS® HFSS™
- Анализ печатных плат и корпусов интегральных схем с точки зрения целостности питания и сигнала и электромагнитной совместимости в ANSYS® SIwave™
- Схемное моделирование радиоэлектроники в ANSYS® Designer™
- Низкочастотное моделирование в ANSYS® Maxwell®
- Проектирование вращающихся электрических машин в ANSYS® RMxprt™
- Проектирование трансформаторов и индукторов в ANSYS® PEXprt™
- Моделирование на системном уровне в ANSYS® Simplorer™
- Тепловой анализ в электромагнитных задачах в ANSYS® Icepak™
- Дополнительные возможности для расчета ВЧ/НЧ электроники ANSYS® Optimetrics™ и ANSYS® ALinks™

## Комплексные решения



Вспомогательное и отраслевое программное обеспечение ANSYS:

- Многодисциплинарный анализ
- Расчетная платформа ANSYS® Workbench™
- Средства геометрического моделирования ANSYS® DesignModeler™ и ANSYS® SpaceClaim Direct Modeler™
- Сеточные генераторы ANSYS® Meshing™ и ANSYS® ICEM CFD™
- Встроенные средства оптимизации ANSYS® DesignXplorer™
- Инструменты для расширения возможностей ANSYS® Customization Suite™
- Управление инженерными данными ANSYS® EKM™
- Высокопроизводительные вычисления ANSYS HPC™
- Решения для проектирования морских сооружений и судов ANSYS® AQWA™ и ANSYS® ASAS™
- Модельно-ориентированная разработка встроенных критических систем в ANSYS® SCADE™
- Лицензирование программных продуктов ANSYS®
- Рекомендуемые приложения

**Инженерная Компания Технополис**

<https://tpolis.com>

[cad@tpolis.com](mailto:cad@tpolis.com)

г. Киев, 01011 переулок Кутузова,3

тел. +3(044)280-31-18

288-85-76

288-89-57