

Точное понимание химических процессов при горении имеет ключевое значение при разработке двигателей

Ellen Meeks, Ph.D.

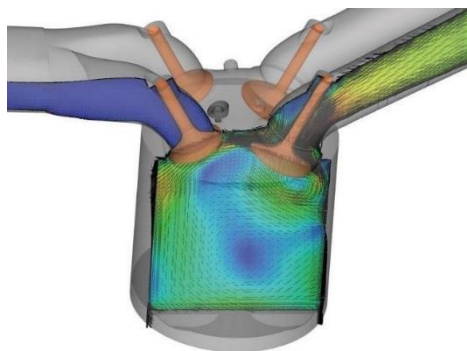
Руководитель по разработке программного обеспечения для моделирования химических процессов

ANSYS, Inc.



Проектирование новых высокоэффективных малотоксичных двигателей внутреннего сгорания связано с рядом технических трудностей, и зачастую наибольшую трудность представляет химическая кинетика процессов горения. Поэтому для моделирования работы современных двигателей необходимы правильные химические модели топлива и модели горения. Здесь можно выделить четыре основных элемента:

1. Исчерпывающие модели топлива, которые точно воспроизводят его химические характеристики.
2. Подробная химическая кинетика для точного описания таких процессов как воспламенение, распространение пламени и образование загрязняющих веществ.
3. Модели распыла, не зависящие от сеточного разрешения и не требующие калибровки.
4. Модели самовоспламенения, позволяющие предсказывать такие сложные явления, как детонация.



Визуализация модуля и векторов скорости в секущей плоскости, проходящей через центр впускного клапана.

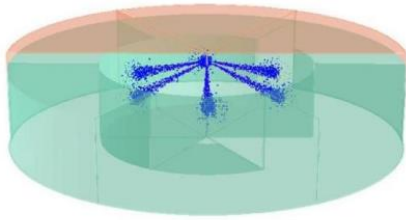
Проектирование новых высокоэффективных малотоксичных двигателей внутреннего сгорания связано с рядом технических трудностей, и зачастую наибольшую трудность представляет химическая кинетика процессов горения. Поэтому для моделирования работы современных двигателей необходимы правильные химические модели топлива и процессов горения. Модели и подходы, успешно применявшиеся при разработке двигателей ещё вчера, оказываются недостаточными при разработке сегодняшних двигателей. Использование устаревших методик в отрасли часто приводит к тому, что численное моделирование не позволяет предсказать ни количественно, ни даже качественно наиболее важные явления, связанные с горением, – воспламенение, распространение пламени и образование загрязняющих веществ. Это не позволяет в полной мере использовать моделирование для повышения эффективности и снижения выбросов.

Адекватность моделирования горения средствами CFD зависит от выбранного вами программного обеспечения. Для точного предсказания характеристик процесса горения в новом двигателе в различных условиях эксперимента и на различном топливе требуется химическая модель, способная адекватно представлять кинетику реального топлива. Программное обеспечение, не учитывающее в расчётах химическую кинетику или использующее грубо упрощённые механизмы горения, не соответствует современным требованиям отрасли. Одно только сеточное разрешение не может компенсировать упрощённые и неточные химические механизмы.

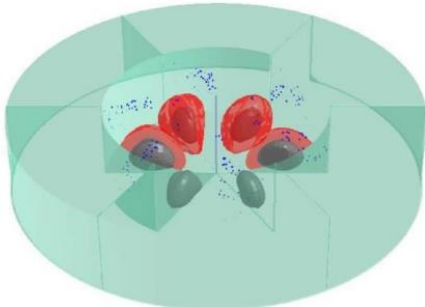
Точная химическая модель топлива необходима ввиду большой сложности моторного топлива. Его состав зависит не только от сезона

(например, летний бензин в США содержит меньше бутана, чем зимний), но и от региона и сферы применения: дизельное топливо в США отличается по свойствам от европейского. А в дополнение к углеводородному топливу, получаемому из нефти, существуют также альтернативные виды топлива, такие как этанол и био-дизель. Для понимания влияния различного состава топлива, а также его комбинаций, требуются достоверные химические модели.

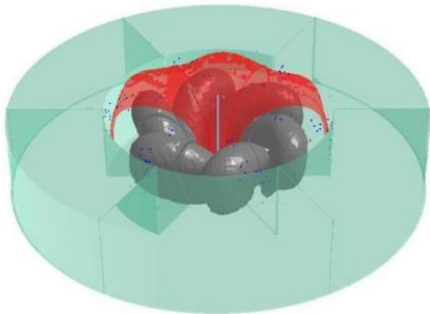
Впрыск



Начало формирования сажи



Рост сажи



Моделирование сажеобразования в
ANSYS Forte

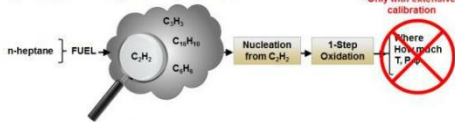
ANSYS Forte™ – специализированный программный модуль для моделирования процессов горения в цилиндрах ДВС. Он включает в себя проверенную технологию Model Fuel Library™ для учёта химической кинетики различных видов топлива и её влияния на процесс горения. Model Fuel Library – это наиболее полная химическая база данных из когда-либо сформированных. Исходно она была разработана компанией Reaction Design, а теперь входит в ANSYS. В 2005 г. Компания собрала консорциум по моделям топлива (Model Fuels Consortium), состоящий из 20 организаций, в том числе – мировых лидеров в области энергетики и двигателестроения, таких как GM, Toyota и VW. Консорциум проводил исследования по повышению экономичности и экологичности двигателей и топлив при помощи точных моделей топлива и инструментов численного моделирования. Компания Reaction Design объединила данные консорциума и произвела их валидацию, в результате чего получилась библиотека Model Fuel Library – база данных подробных кинетических механизмов для более чем 60 топливных компонентов, в которой отражены все типы реакций, важных для моделирования горения.

Сегодня Model Fuel Library является основой ANSYS Forte, давая возможность проведения высокоточных расчётов горения. Программный продукт ANSYS Forte прост в использовании и быстр. Подробная химическая кинетика и модели топлива позволяют учесть все аспекты работы современных двигателей, включая воспламенение, распространение пламени, образование загрязняющих веществ и детонацию двигателя, а также влияние изменения состава топлива и смешения различных топлив. Таким образом, экспертам отрасли больше не нужно беспокоиться о сохранении эффективности инструментов численного моделирования горения в современных условиях.

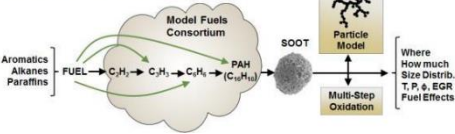
Логика подсказывает, что учёт всех этих топливных компонентов и механизмов должен обязательно идти в ущерб скорости счёта, но в данном случае такая логика ошибочна. Компромисс между точностью и скоростью счёта устраняется за счёт применения метода разреженных матриц, золотого стандарта в области моделирования химической кинетики. Численный алгоритм ANSYS Forte производит динамическую кластеризацию ячеек, которая позволяет группировать ячейки с одинаковым термохимическим состоянием на каждом шаге по времени для исключения дублирующихся расчётов. Кроме того, алгоритм Dynamic Adaptive Chemistry автоматически редуцирует кинетический механизм в процессе счёта на каждом временном шаге. Используя минимально необходимую часть кинетического механизма в определённые моменты времени, можно значительно сократить время счёта без потери точности.

Это меняет устоявшееся правило масштабируемости: расчётное время растёт не пропорционально возведённому в куб количеству компонентов, как обычно, а линейно. Это позволяет включить то

Traditional "Simple" Soot Model



Accurate Soot Modeling in FORTÉ

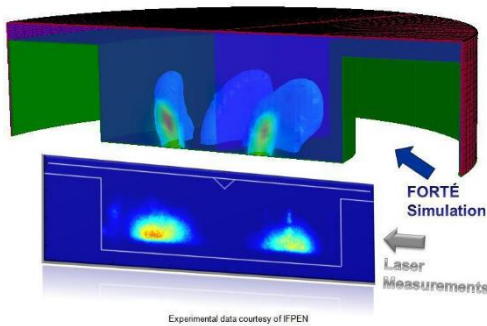


Моделирование сажеобразования является одним из самых сложных аспектов моделирования работы ДВС. Имея точные модели топлива, подробные кинетические механизмы и нечувствительные к сеточному разрешению модели распыла, ANSYS Forte преодолевает препятствия и даёт точное предсказание сажи.

количество реакций, которое необходимо для обеспечения точности, и при этом не проиграть с точки зрения времени вычислений. В расчёт можно включать более подробные и точные модели топлива, при этом время счёта будет сопоставимо со временем счёта на очень сокращённых и неточных моделях.

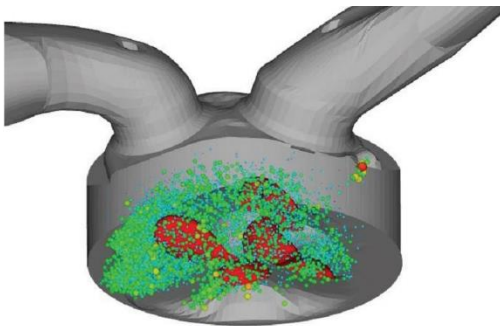
Дополнительную сложность при моделировании работы ДВС представляет распыл. Выбор модели распыла может в значительной степени влиять как на быстроту получения результатов, так и на их точность. Большинство используемых сегодня моделей распыла имеют высокую чувствительность к сеточному разрешению модели, что приводит к необходимости тратить ценное время на нахождение оптимального сочетания параметров сетки и модели распыла. Проблема здесь заключается в том, что необходимо знать поведение факела распыла в данном конкретном цилиндре для настройки модели распыла. Даже если удаётся откалибровать модель для конкретной сетки, остаётся неясным, насколько эффективной будет эта модель для другой конструкции цилиндра, в результате весь процесс, возможно, придётся повторять. Калибровка модели требует особых знаний и опыта, и это препятствует распространению расчётных методик внутри организации. ANSYS Forte позволяет быстро и легко справиться с моделированием распыла без необходимости трудоёмкой калибровки.

Soot levels at 10° after top dead center



Предсказание сажи в ANSYS Forte хорошо согласуется с экспериментом

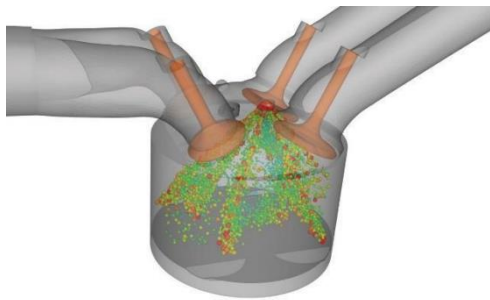
Важным направлением в разработке ДВС является снижение содержания сажи в выхлопных газах для удовлетворения ужесточающихся норм выбросов. Однако известно, что моделирование сажеобразования в традиционном программном обеспечении для численного моделирования затруднительно ввиду высокой сложности физических и химических процессов, отвечающих за образование частиц сажи. ANSYS Forte предсказывает размер частиц и отслеживает их рост в процессе работы двигателя. Заложенные в программу модели позволяют учитывать образование сажи от различных источников через зародышеобразование, рост, агломерацию и окисление частиц. В результате становится возможным предсказание распределения размера частиц на выходе из двигателя.



Визуализация факела распыла и изоповерхности избытка воздуха

Наконец, обратимся к проблеме стука в двигателе. Он происходит, когда сжатая в высокой степени топливовоздушная смесь в цилиндре самовоспламеняется, либо до, либо после того момента, когда предполагается воспламенение при помощи искры. Искра становится начальным центром воспламенения, после чего быстро переходит в тонкую поверхность пламени, которая движется по камере, сжимая свежую смесь впереди себя. Когда топливовоздушная смесь воспламеняется вне предполагаемого периода зажигания, происходит детонация, или стук. Детонационные режимы ограничивают производительность двигателя и со временем могут привести к его разрушению.

Основными элементами предсказания детонации являются точное моделирование положения и структуры фронта пламени по мере его распространения в камере сгорания, а также учёт кинетики самовоспламенения в свежей смеси. Однако моделирование самовоспламенения в цилиндре трудно реализуемо традиционными инструментами CFD, особенно теми, что основываются на избыточном сгущении сетки в области фронта пламени, оставляя в зоне свежей



Визуализация факела в начальный момент распыла

смеси неточную химию и грубую сетку. Поскольку масштаб толщины фронта пламени намного меньше шага сетки, даже при интенсивном сгущении, традиционные CFD-пакеты, опирающиеся на сгущение сетки, требуют для достаточного разрешения структуры пламени огромного количества очень мелких ячеек. Подобные сетки с избыточным количеством мелких ячеек легко могут приводить к необходимости применения очень малых шагов по времени для обеспечения устойчивости, в результате чего время счёта становится недопустимо долгим.

Вместо вычислительно сложных подходов, основанных на сверхподробных сетках, в ANSYS Forte используется проверенные математические модели и численные алгоритмы, такие как модель Discreet Particle Ignition Kernel (DPIK, ядро воспламенения отдельной частицы) или метод трассировки фронта пламени на основе G-уравнения, в результате чего распространение пламени рассчитывается быстро и точно. В сочетании этих моделей с использованием библиотеки подробных кинетических механизмов и специального калькулятора индекса детонации, продукт ANSYS Forte даёт разработчикам ДВС надёжный инструмент для предсказания самовоспламенения и детонации в двигателе при различных условиях работы.

Это лишь несколько примеров того, как ANSYS Forte может отвечать современным инженерным проблемам при разработке ДВС без ущерба точности или скорости счёта. Применение подробных и реалистичных химических механизмов гораздо эффективнее, чем упрощение химии с последовательным сгущением сетки. Охватывая всё разнообразие химии горения и разрешая трудности её моделирования, ANSYS Forte даёт наиболее точные результаты, что позволяет сократить время разработки двигателя и сэкономить деньги.