



Опыт создания элементов цифровой модели тепломеханического оборудования АЭС на базе платформы DT Seven в ООО «ААЭМ»

Александр Гаев, Вячеслав Фёдоров, Ирина Стрекалова, Алексей Кечков, Михаил Егоров, Михаил Гусев

В настоящей статье представлен опыт ООО «Турбинные технологии ААЭМ» (ААЭМ) по использованию платформы DT Seven в качестве инструмента создания автоматизированных расчетных цепочек для обоснования целостности тепломеханического оборудования АЭС в соответствии с нормативными требованиями. На основании разработанных расчетных цепочек планируется построение цифровых моделей, а впоследствии — и цифровых двойников тепломеханического оборудования на стадии разработки и проектирования (ЦД-Р).

Введение

Процессы проектирования тепломеханического оборудования (ТМО) АЭС должны строго соответствовать нормативным ограничениям, заложенным в нормативной документации (НД) верхнего уровня, такой как НП-110-25 «Основные требования к расчетам на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» или Федеральные нормы и правила «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением». НД верхнего уровня требуют от проектировщика давать оценку прочности и ресурса проектируемого оборудования и задают нормативные ограничения (зачастую излишне консервативные) в части критериев предельного состояния ТМО АЭС и коэффициентов запаса. При этом должно быть выполнено расчетное обо-

снование, что ТМО АЭС не выйдет за предельные состояния в течение всего срока эксплуатации, который может составлять 60 и более лет.

Для выполнения такого расчетного обоснования применяются различные методы и методики определения напряженно-деформированного состояния и оценки ресурсных характеристик изделий. При этом для получения качественного результата требуется проведение мультидисциплинарных расчетов, учитывающих различные физические явления и процессы и связи между ними.

В настоящее время основным направлением при создании конкурентоспособной высокотехнологичной продукции, к которой, безусловно, относится ТМО АЭС, является переход к использованию передовых цифровых производственных технологий и цифрового инжиниринга. Применение

Александр Гаев

Начальник отдела прочностных расчетов теплообменного оборудования, к.т.н., ООО «ААЭМ».

Вячеслав Фёдоров

Главный специалист отдела прочностных расчетов теплообменного оборудования, ООО «ААЭМ».

Ирина Стрекалова

Ведущий специалист отдела прочностных расчетов теплообменного оборудования, ООО «ААЭМ».

Алексей Кечков

Начальник отдела, ООО «КЭЛС-центр».

Михаил Егоров

Ведущий инженер, ООО «КЭЛС-центр».

Михаил Гусев

Главный специалист, ООО «КЭЛС-центр».

этих технологий должно позволить, с одной стороны, обеспечить безусловное выполнение нормативных требований, а с другой — повысить качество расчетных исследований, обеспечить их повторяемость и одновременно сократить сроки их выполнения.

Для этого требуется разработка методов и методик расчетных исследований на основе мультидисциплинарных расчетов, выбор и адаптация соответствующих расчетных систем, а также автоматизация всего процесса расчетного исследования, что дополнительно позволит избавить инженера-расчетчика от рутинной производственной работы по подготовке данных, запуску расчета и первичному анализу результатов. В ко-



нечном счете речь идет о создании цифровой модели ТМО АЭС, предназначенной для оценки и обоснования прочности и ресурса оборудования в соответствии с нормативными требованиями.

Создание цифровой модели ТМО АЭС должно выполняться в несколько этапов. На первом этапе необходимо отработать создание элементов цифровой модели, обеспечивающих решение отдельных задач, причем с учетом необходимости перехода от использования зарубежных решателей (ANSYS) к отечественным (Логос). Далее приведены результаты разработки и апробации элементов цифровой модели ТМО АЭС для решения отдельных расчетных задач.

Цифровая модель для оценки прочности и ресурса ТМО АЭС

Цифровая модель для оценки прочности и ресурса ТМО АЭС должна включать расчетные методики, реализованные в расчетных системах, и платформу для автоматизации, оптимизации параметров расчетных моделей и анализа результатов расчетов.

Ввиду отмеченных выше особенностей проектирования ТМО АЭС и с учетом имеющихся нормативных требований в части содержания расчетного обоснования прочности, разрабатываемая цифровая модель должна реализовывать следующие расчетные методики:

1. Оптимизационный расчет по подбору основных размеров ТМО.
2. Поверочные расчеты:
 - расчет статической прочности;
 - расчет циклической прочности;

- расчет устойчивости;
- расчет нагрузок на строительные конструкции.

В качестве платформы для создания цифровых моделей в ААЭМ выбрана платформа DT Seven, предназначенная для исследования и оптимизации моделей и дополняющая средства проектирования и инженерного анализа.

С целью отработки возможности создания в DT Seven автоматизированных расчетных цепочек для реализации перечисленных выше расчетных методик были решены модельные задачи, позволяющие автоматизировать в виде рабочего процесса DT Seven следующие типовые расчеты для типового элемента ТМО сосуда давления (рис. 1):

- расчет нагрузок от сосуда давления на строительные конструкции;
- расчет статической прочности сосуда давления.

Для решения модельных задач потребовалось реализовать связку платформы DT Seven с CAE-системами ANSYS и Логос.

Решение модельных задач проводилось в процессе опытно-промышленной эксплуатации DT Seven в ААЭМ во взаимодей-

ствии с компанией-поставщиком DT Seven — компанией «Корпоративные электронные системы» (КЭЛС-центр).

Решение модельных задач с использованием DT Seven и решателя ANSYS

В качестве первой модельной задачи решалась задача поиска максимальных нагрузок от сосуда давления на строительные конструкции. Конструкция сосуда давления представлена на рис. 1. Имеется два закрепления: жесткая и скользящая заделки. На пять патрубков сосуда давления приложены нагрузки от присоединенного оборудования в виде трех сил и трех моментов на каждый патрубок (рис. 2). Значения нагрузок по модулю остаются неизменными. Может меняться только направление приложения каждой нагрузки.

В рамках решения задачи разработана представленная на рис. 3 автоматизированная расчетная цепочка, которая позволяет:

- запускать автоматический расчет и при этом задавать в качестве исходных данных:

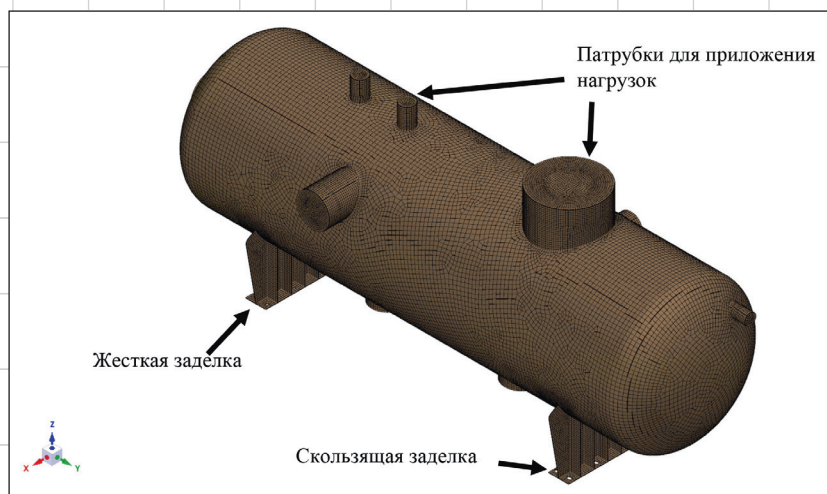


Рис. 1. Общий вид модельного изделия (сосуда давления)

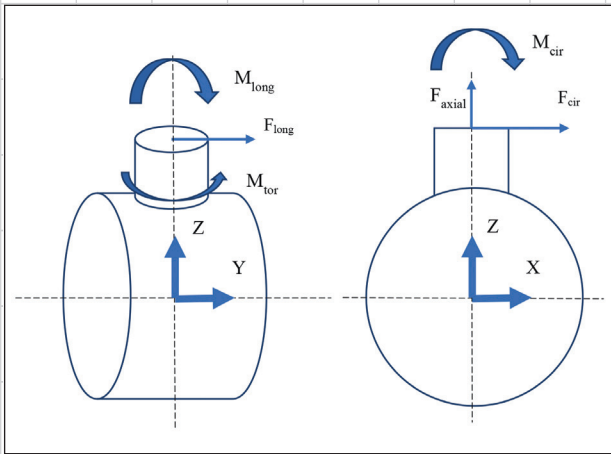


Рис. 2. Нагрузки от патрубков на сосуд давления

- характеристики материала сосуда давления,
 - значение внутреннего давления в конструкции изделия;
 - автоматически варьировать значения приложенных сил и моментов;
 - проводить расчет нагрузок на строительные конструкции;
 - получать числовые значения нагрузок на строительные конструкции и графики сходимости процесса.
- В расчетной цепочке в блоке DSE варьируются направления сил и моментов. Всего было задано 30 варьируемых параметров (пять патрубков, три силы, три момента на каждом). На каждом шаге комбинация нагрузок передается на расчет в решатель и по завершении расчета

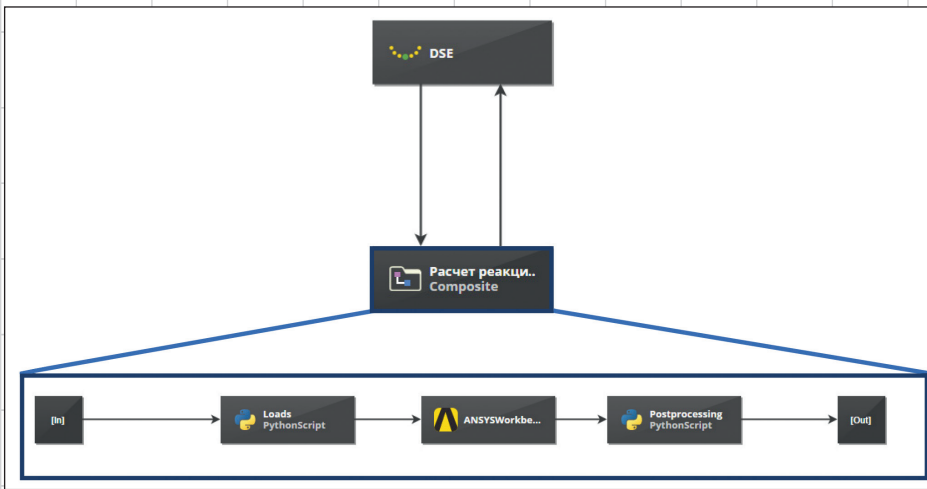


Рис. 3. Расчетная цепочка для автоматизированного определения нагрузок на строительные конструкции

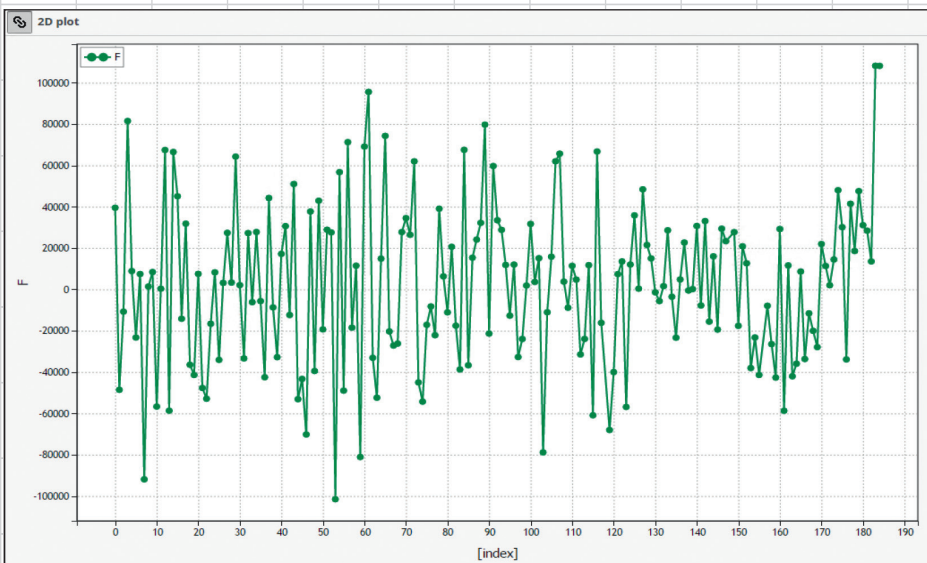


Рис. 4. График зависимости реакции в опоре (нагрузки на строительные конструкции — ось Y) от итерации поиска решения (ось X)

считываются значения реакций в опорах (нагрузки на строительные конструкции). Процесс автоматически повторяется с целью поиска максимальных нагрузок на строительные конструкции. Для решения задачи потребовалось провести 184 расчетные итерации. На рис. 4 изображен процесс поиска решения. Разработанная расчетная цепочка может быть использована и для анализа сосудов других типоразмеров.

В рамках второй модельной задачи для расчета статической прочности сосуда давления была подготовлена расчетная модель сосуда давления, представленная на рис. 5. Модель представляет собой бак на опорах, одна из которых жестко закреплена, а вторая остается подвижной по направлению оси Y. К баку приложена инерционная нагрузка.

В расчетной модели применены граничные



условия жесткой и скользящей заделки. Задана инерционная нагрузка в виде монотонно возрастающей функции. Под предельной нагрузкой понимается такое значение, при котором расчет статической прочности заканчивается с ошибкой. С физической точки зрения это означает развитие «пластического шарнира».

Для решения данной задачи в DT Seven была разработана расчетная цепочка, представленная на рис. 6.

В блоке прямой интеграции *ANSYS WB* происходит запуск проекта для расчета статической прочности в рамках проекта *ANSYS Workbench*, где находится модуль *Mechanical* с решателем *APDL*. При этом задана линейно возрастающая инерционная нагрузка.

Так как в процессе решения нагрузка возрастает на каждой итерации расчета, то на каждой итерации формируются промежуточные результаты расчета статической прочности. Блок *Int. Results* служит для считывания промежуточных результатов, полученных в процессе решения задачи с использованием постпроцессора *ANSYS APDL*.

На рис. 7 представлена зависимость реакции в неподвижной опоре конструкции от итерации считывания промежуточных результатов в блоке *Int. Results*. Начиная с 24-й итерации, значение реакции опоры не меняется. Это означает, что начиная с 24-го шага расчет завершается с ошибкой и достигнута предельная нагрузка.

На рис. 8 изображен развитый «пластический шарнир» в конструкции, вызванный инерционной нагрузкой, близкой к предельной.

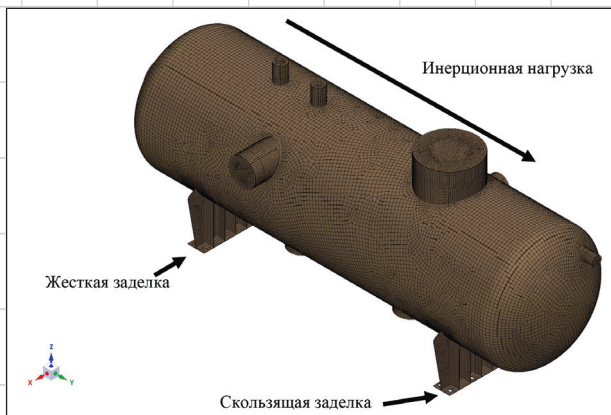


Рис. 5. Расчетная модель сосуда давления

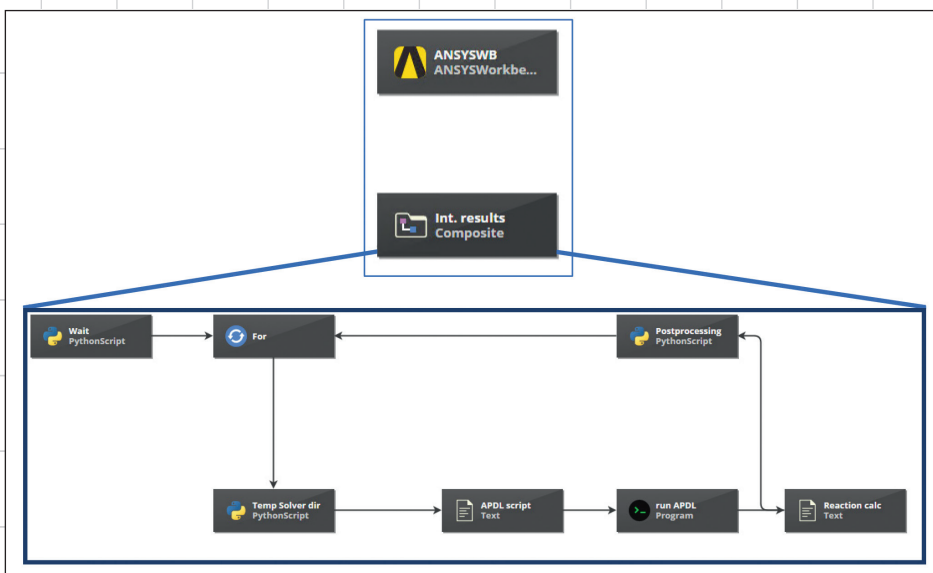


Рис. 6. Расчетная цепочка для определения предельных нагрузок для статического расчета

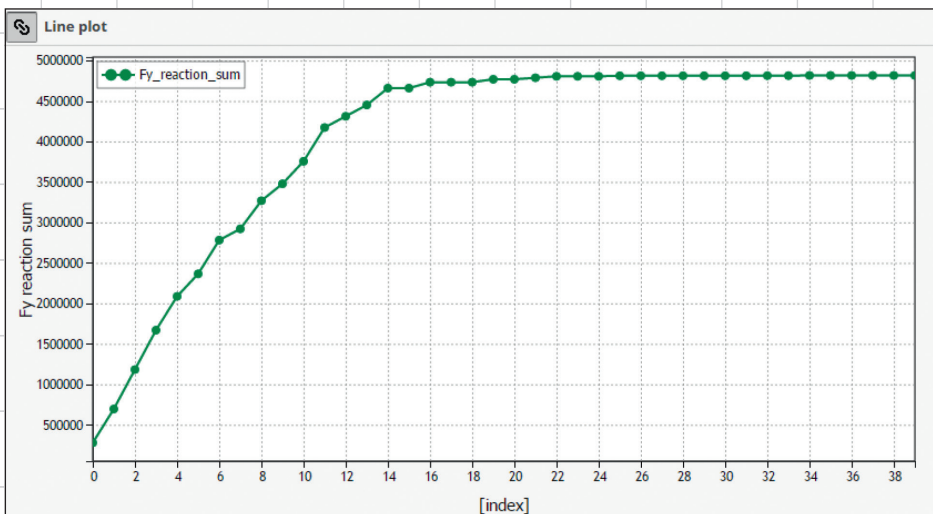


Рис. 7. Зависимость реакции в опоре (ось Y) от итерации считывания промежуточных результатов (ось X)

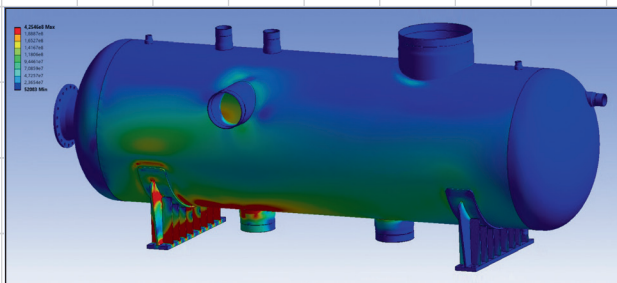


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений в конструкции при нагрузке, близкой к предельной

Решение по нахождению предельной нагрузки реализовано в DT Seven полностью в автоматизированном виде. Дополнительных действий пользователя в процессе расчета не требуется. При этом в качестве решателя вместо ANSYS APDL может быть использован другой код, расчетная цепочка в DT Seven, по сути, не поменяется. Следует отметить, что решение такой задачи в ANSYS Workbench не будет полностью автоматизированным и пользователю нужно вручную проверять достижение предельной нагрузки. При этом если пропустить нужный момент, то промежуточные результаты будут перезаписаны и пользователь увидит только конечное состояние решателя с ошибкой без значения предельной нагрузки.

Решение и верификация модельных задач с использованием DT Seven и решателя Логос Прочность

С целью построения импортонезависимого программного решения по созданию цифровых моде-

лей ТМО АЭС модельная задача по поиску максимальных нагрузок от сосуда давления на строительные конструкции была также реализована с использованием решателя системы Логос Прочность. С учетом специфики архитектуры и построения пакета программ Логос, а также опыта использования решателя ANSYS, при разработке расчетных цепочек для решения модельных задач изначально был принят подход, основанный на скриптовании расчетной модели при помощи взаимодействия с системой Логос Прочность через API на языке Python. Это позволило существенно повысить стабильность и быстродействие работы расчетных цепочек, а также получить результаты, аналогичные полученным с использованием решателя ANSYS. Кроме того, проводилась верификация результатов, полученных при помощи решателя Логос Прочность и оптимизатора DT Seven с соответствующими данными, полученными с помощью оптимизатора Design Exploration, встроенного в ANSYS.

Рассматривалась конечно-элементная модель, приведенная на рис. 1. При этом задавалось 48 варьируемых параметров в виде единичных сил и моментов, так как нагрузки приложены на восемь патрубков вместо пяти. В данном случае сравнивались максимальные реакции опор, рассчитанные аналитическим и численными методами: генетический оптимизатор MOGA (Multi-Objective Generic Algorithm), встроенный в ПО ANSYS, и алгоритм на основе метамоделей SBO (Surrogate Based Optimization), встроенный в DT Seven.

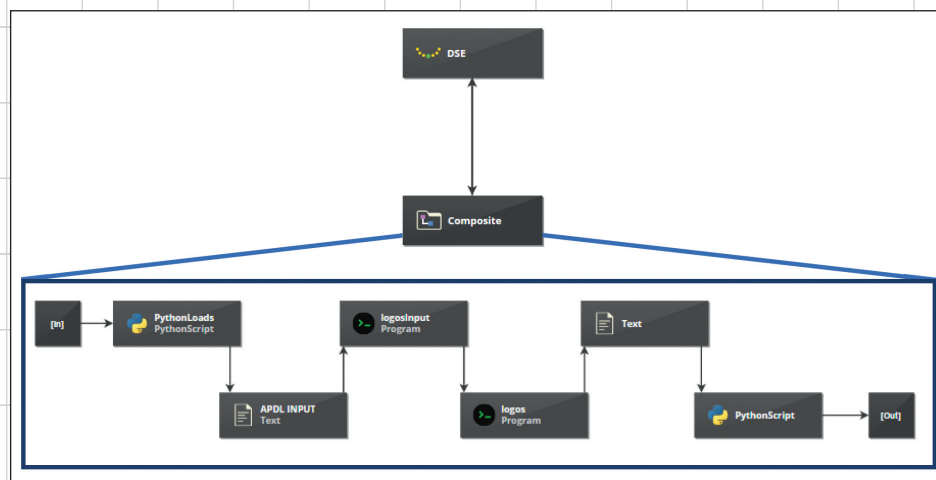


Рис. 9. Расчетная цепочка для автоматизированного определения нагрузок от патрубков сосуда давления на строительные конструкции с использованием пакета Логос Прочность

Расчетная цепочка для поиска максимальных нагрузок на строительные конструкции с использованием Логос Прочность в DT Seven, приведенная на рис. 9, была доработана по сравнению со схемой на рис. 3.

В таблице представлены результаты расчета максимальной нагрузки на строительные конструкции по одной из осей аналитическим и численными методами. Результаты расче-



Сравнение максимальных нагрузок, полученных различными методами

	Аналитическое решение	MOGA (ANSYS)	SBO (DT Seven + Логос)
Fx, Н	8	8	8
Mx, Н·м	34	30,9	30,1

та с использованием DT Seven и Логос демонстрируют приемлемое отклонение от аналитического решения.

При корректно выбранном количестве итераций связка DT Seven + Логос демонстрирует высокую скорость расчетов и поиска экстремума. В рассматриваемой задаче по сравнению с ПО ANSYS расчетная цепочка находит оптимальное значение быстрее на 10%.

Впоследствии реализованный подход может быть легко применен для решения задач циклической прочности и устойчивости.

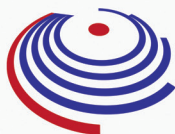
Заключение

Полученные результаты решения серии модельных задач демонстрируют эффективность использования системы DT Seven при построении автоматизированных расчетных цепочек и элементов цифровых моделей на этапе проектирования ТМО АЭС. В дальнейшем в проектной деятельности ААЭМ планирует-

ся создание полноценных цифровых моделей, объединенных в единую расчетную среду, которые позволяют проводить в соответствии с нормативными требованиями:

- расчеты статической прочности;
- расчеты сейсмостойкости;
- поиск максимальных нагрузок на строительную часть;
- расчеты на циклическую прочность и устойчивость.

После отработки технологии создания цифровых моделей, позволяющих проводить все необходимые виды инженерного анализа и оптимизационные исследования для обоснования прочности разрабатываемого ТМО, планируется создание цифровых двойников ТМО типа ЦД-Р (а впоследствии и типов ЦД-П и ЦД-Э), позволяющих существенно сократить сроки принятия решений при наличии коллизий на любой стадии жизненного цикла изделия. ➤



КАЛС · ЦЕНТР

Реклама

DT Seven

анализ данных
и оптимизация
**цифровых
моделей**



Enterprise

автоматизация
и управление
**коллективными
расчётами**

DATAADVANCE

Пилотный проект на ваших задачах: dt.calscenter.ru



- ✉ info@calscenter.ru
- ☎ 8 (499) 707-17-59
- 📍 г. Москва, Дмитровское ш., д. 163А к. 2, офис 4.15