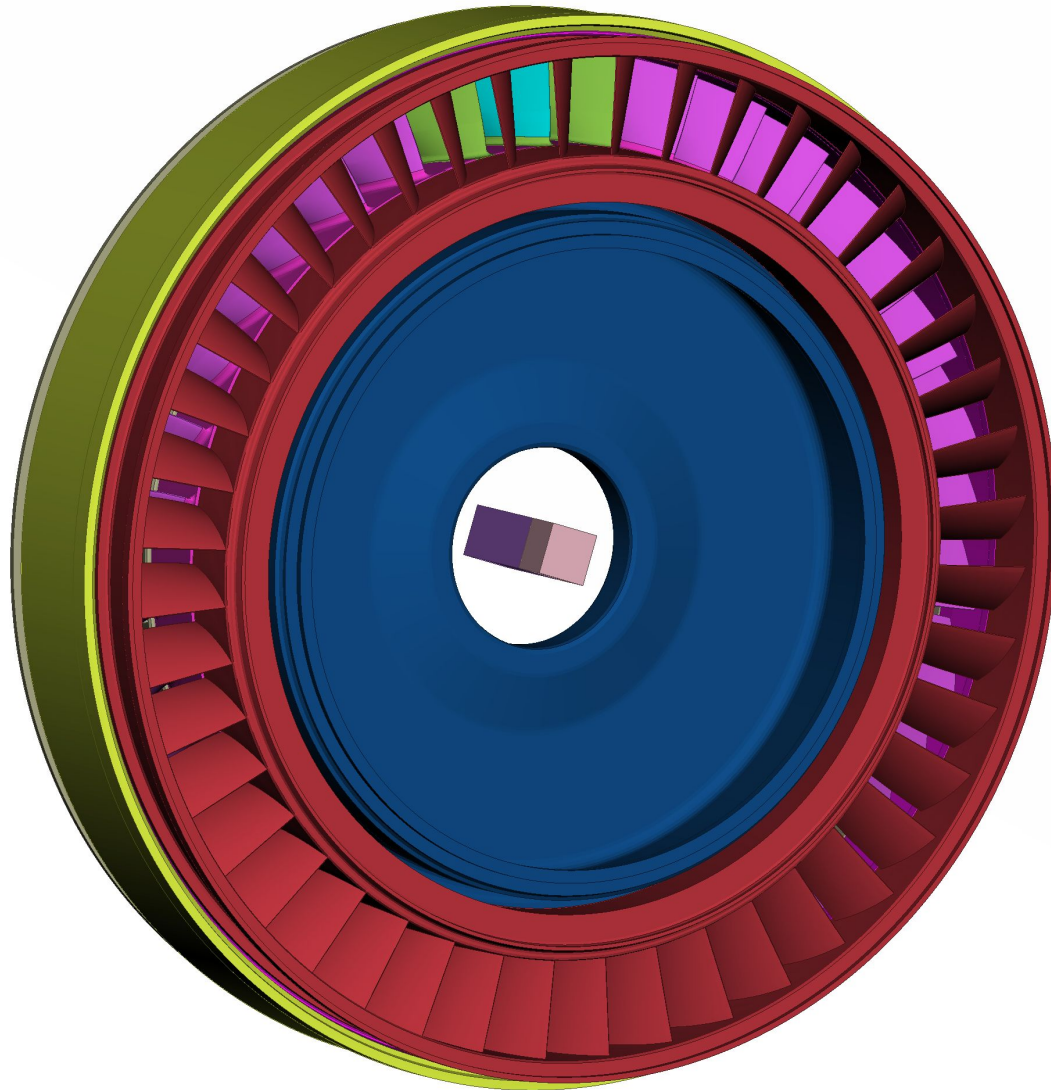
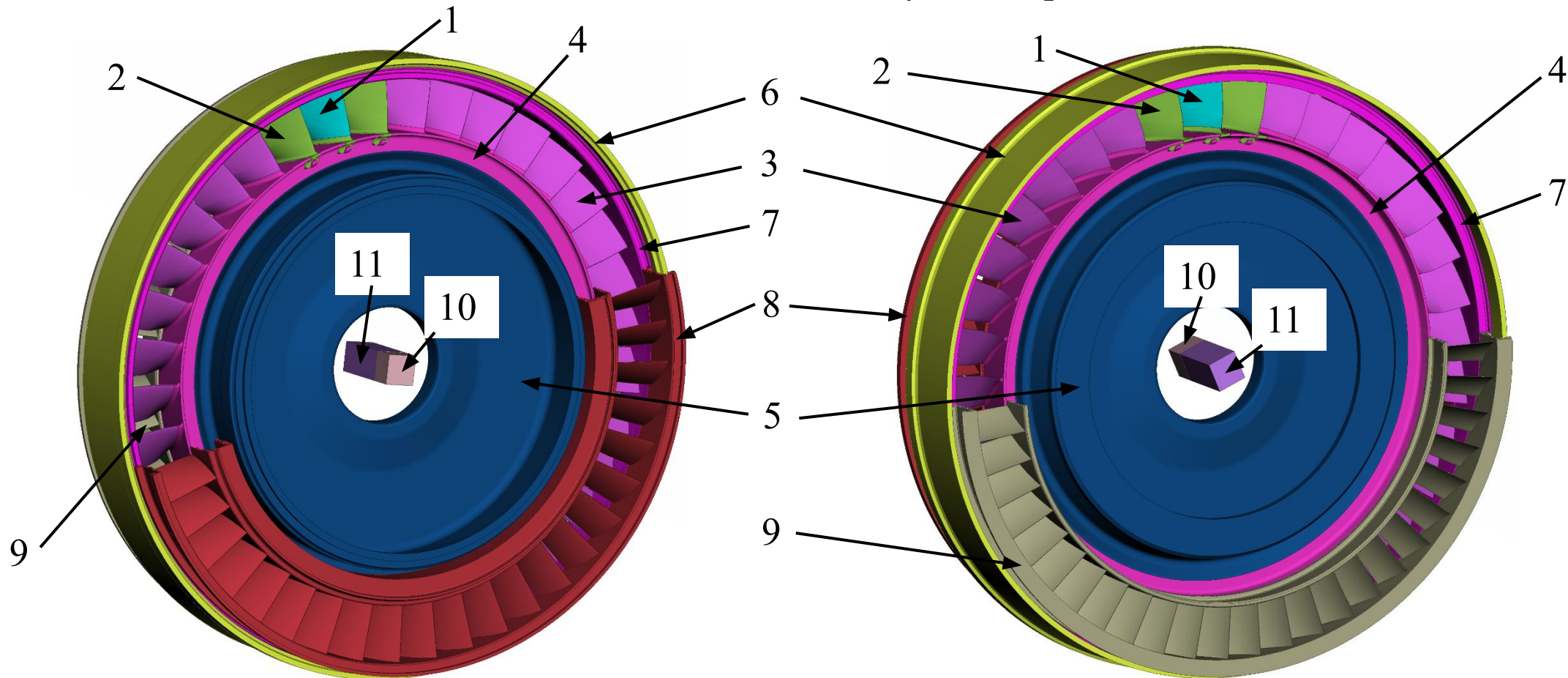


Оценка прочности корпуса компрессора ГТД при ударе оторвавшейся лопатки



Мною была решена задача проверки возможности вылета лопатки одной из ступеней осевого компрессора за пределы корпуса с помощью программы конечноэлементного анализа LS-DYNA. В данной презентации приведено описание решения задачи и полученных результатов.

Общий вид модели, используемой в расчёте



Компоненты 1, 2 и 3 – рабочие лопатки (с целью упрощения модели хвостовики всех лопаток компонента 3 объединены с диском); компоненты 4 и 5 – части диска, компонент 6 – внешняя обечайка корпуса, компонент 7 – внутренняя обечайка корпуса, компоненты 8 и 9 – направляющие аппараты (показаны только частично), компоненты 10 и 11 – тела, необходимые для ограничения движения и подавления автоколебаний части ротора осевого компрессора, используемой в расчёте. Компоненты 1-5 все вместе для удобства в дальнейшем будем называть ротором расчётной модели.

Физические и механические свойства материалов модели

| Номер компонен- тов модели | Марка материала | | | | | | |
|----------------------------------|---|-------|-----|-----|------|------|-----|
| 1-5 | Сплав ВТ8 | 103,5 | 768 | 861 | 4480 | – | 0,3 |
| 6 | Сплав ОТ4-1 | 89,02 | 384 | 445 | 4550 | 1126 | 0,3 |
| 7-9 | Сталь 11Х11Н2В2 МФ-Ш (ЭИ962-Ш) | 193,9 | 735 | 835 | 7800 | 1893 | 0,3 |
| 10,11 | – | 103,5 | – | – | 4480 | – | 0,3 |

В соответствии с исходными данными перепад температур в расчётной модели незначителен, потому влияние температуры было учтено косвенно через изменение свойств материалов. Свойства материалов взяты при следующих температурах:

Сплав ВТ8 – 228 °С,

Сплав ОТ4-1 – 215 °С,

Сталь 11Х11Н2В2МФ-Ш – 221 °С.

Модели материалов, размеры, типы элементов и количество узлов

| Номер компонент- тов модели | Модель материала | Размер элементов, мм | Типы элементов | Количество узлов |
|--------------------------------|---|---|--|------------------------------------|
| 1-5 | *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY Упругопластический изотропный материал с возможностью задания произвольной кривой зависимости напряжений от деформации, критерия разрушения и учёта влияния скорости деформирования | 0,15-0,5 (лопатки), 0,5(0,3 вблизи мест крепления вылетающей лопатки и двух соседних)-1,2(диск) | Тетраэдрические, гексаэдрические, пирамидные (четырёхугольные пирамиды), призматические (треугольные призмы) | 4, 8, 5 и 6 соответст- венно |
| 6,7 | *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY Упругопластический изотропный материал | 0,5-1,8 | гексаэдрические | 8 |
| 8,9 | *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY Упругопластический изотропный материал | 0,2-1 | Тетраэдрические, гексаэдрические, пирамидные (четырёхугольные пирамиды). | 4, 8 и 6 соответст- венно |
| 10 | *MAT_ELASTIC Упругий материал | 2 | гексаэдрические | 8 |
| 11 | *MAT_RIGID Абсолютно твёрдый материал | 2 | гексаэдрические | 8 |

Зависимость напряжений от деформации для сплава ВТ8

Поскольку для сплава ВТ8 в качестве исходных данных были получены диаграммы деформирования материала для ряда температур, то в расчёте для данного материала была использована кривая зависимости истинных напряжений (true stress) от эффективной пластической деформации (effective plastic strain).

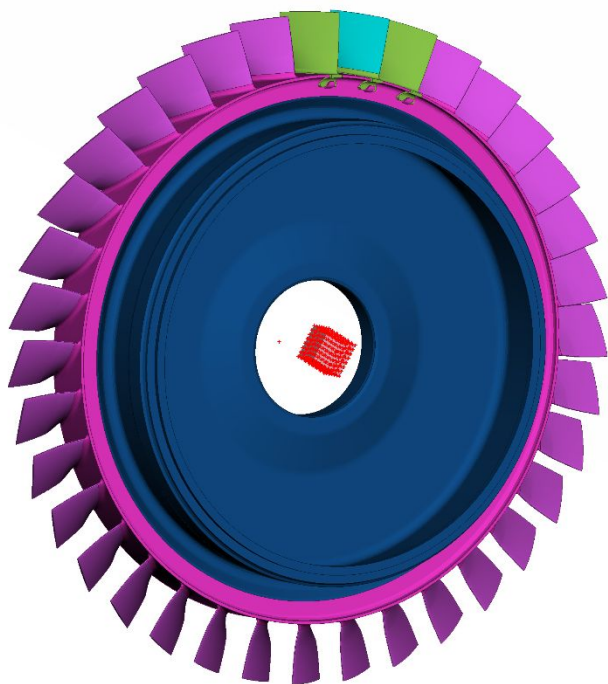
| Эффективная пластическая деформация | Истинные напряжения, МПа |
|-------------------------------------|--------------------------|
| 0,002 | 775,59136 |
| 0,00246 | 787,0146235 |
| 0,00532 | 798,5200795 |
| 0,0681 | 929,754477 |



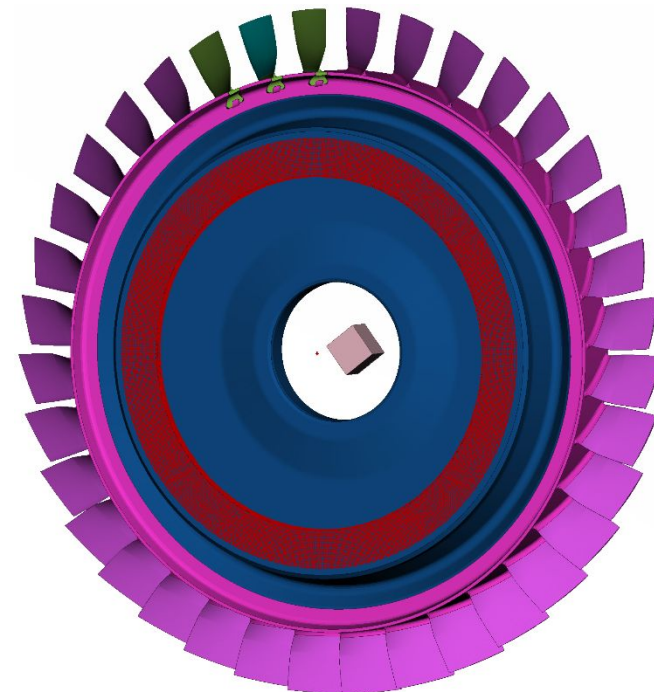
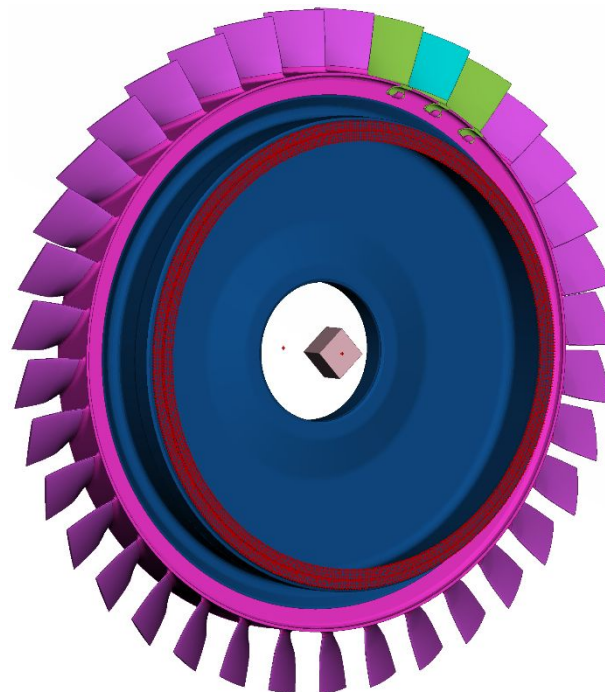
Ограничения на движение и нагружение расчётной модели

В соответствии с исходными данными по наиболее опасному расчётному режиму ротору расчётной модели (компоненты 1-5) была задана скорость вращения 3169 рад/с (30262 об/мин, карты *INITIAL_VELOCITY_GENERATION, *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION).

Для задания ограничений на вращение расчётной модели было создано два абсолютно твёрдых узловых тела (карта *CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY) А и Б. Во избежание возможных проблем перед созданием узлового твёрдого тела А в расчётную модель было добавлено простое упругое тело (компонент 10), узлы элементов которого и были использованы при создании узлового твёрдого тела А. Узловому твёрдому телу А запрещены любые движения. Из двух твёрдых узловых тел с помощью карты *CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE был получен цилиндрический шарнир (цилиндрический шарнир запрещает любое относительное движение, кроме вращения одного тела относительно другого).

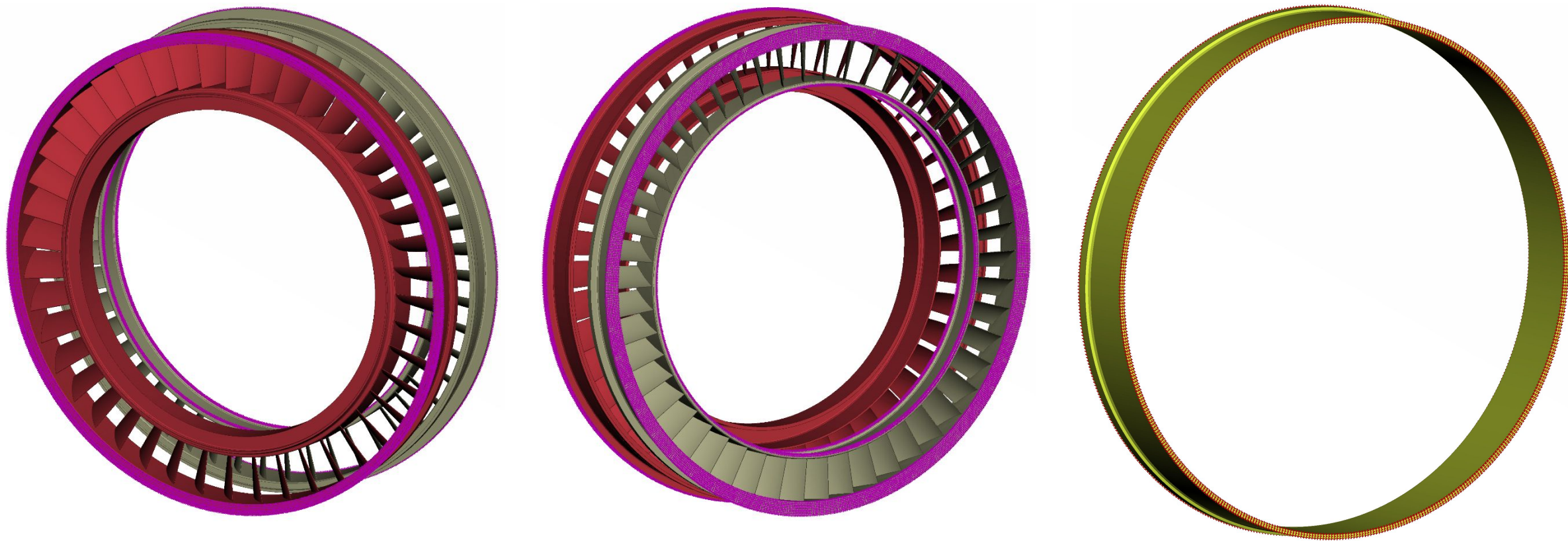


Узлы, из которых созданы абсолютно твёрдые узловые тела А (слева) и Б (справа).



Ограничения на движение расчётной модели

Узлы по краям направляющих аппаратов жёстко закреплены. Также, как и узлы по краям внешней обечайки корпуса.



Жёсткое закрепление узлов

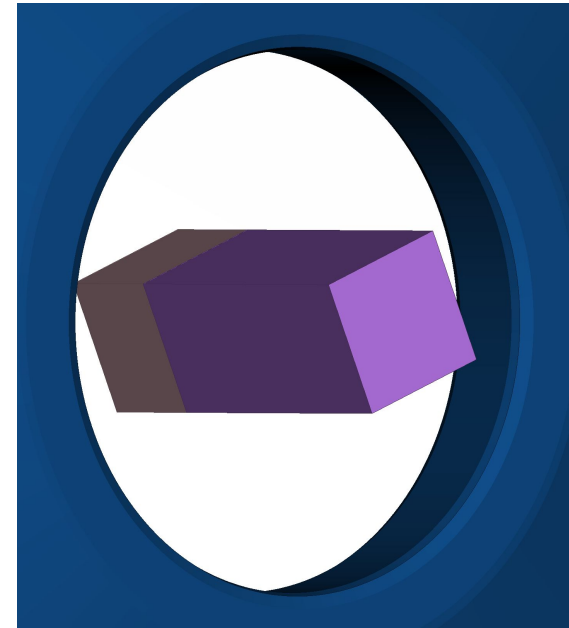
Демпфирование автоколебаний ротора расчётной модели

Несмотря на использование специально предназначенной для этого карты *INITIAL_VELOCITY_GENERATION при задании скорости вращения в начальный момент времени расчёта появляются автоколебания ротора. Вызваны они предположительно быстрым деформированием системы в очень короткий промежуток времени и проявляются в очень ощутимых колебаниях напряжений ($\sim \pm 50\%$ от значений эквивалентных (по Мизесу) напряжений в сравнении с расчётом, в котором их удалось подавить). Для подавления данных автоколебаний были применены карты *DAMPING_RELATIVE.

Чтобы использовать карту *DAMPING_RELATIVE, необходимо выполнение двух условий:

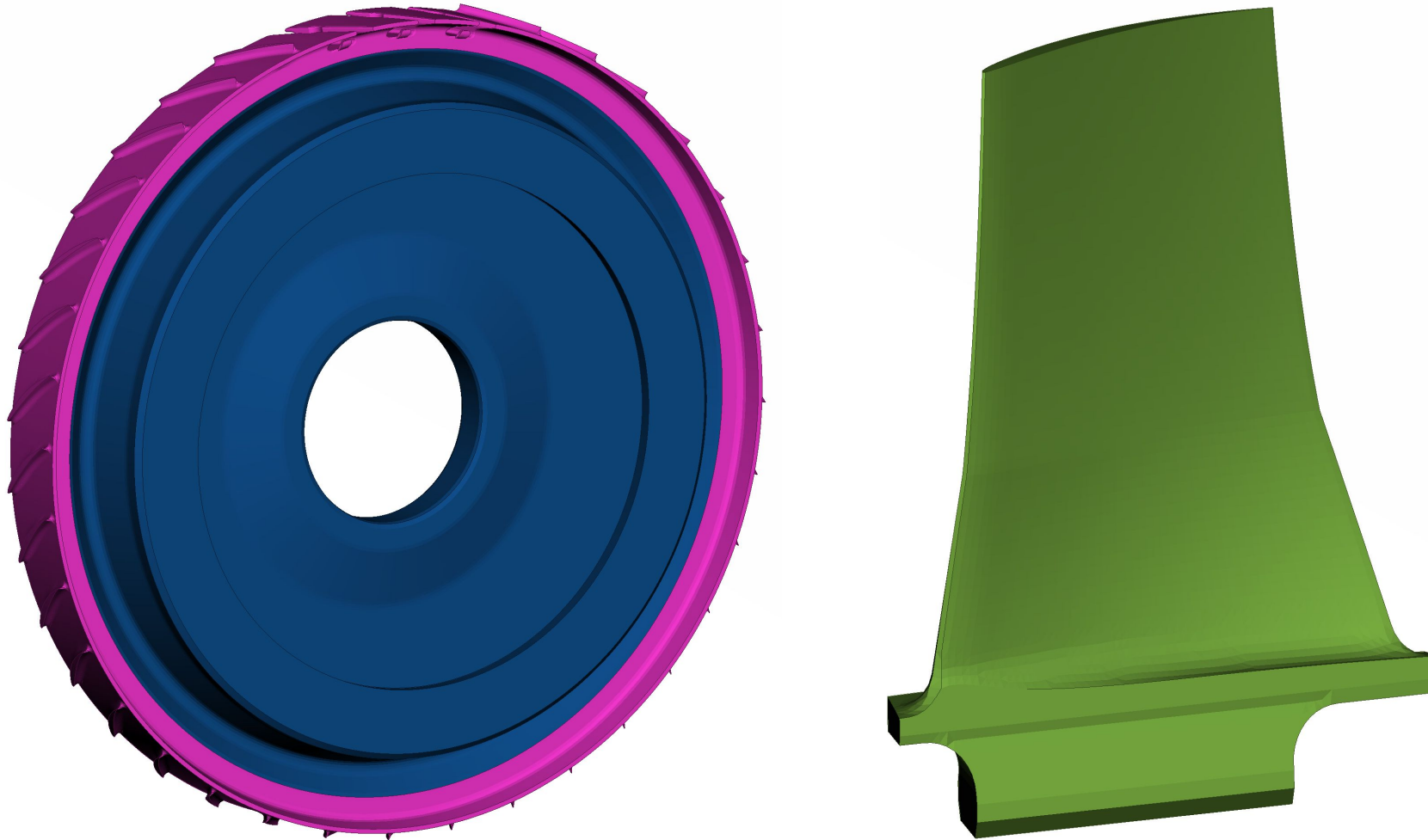
1. Нужно создать абсолютно твёрдое тело, которое будет двигаться также, как и компоненты, колебания которых необходимо подавить.
2. Нужно определить частоту, на которой будет применено демпфирование колебаний.

Для выполнения первого условия было создано абсолютно твёрдое тело (компонент 11) и ему задано вращение (3169 рад/с).



Демпфирование автоколебаний ротора расчётной модели

Для выполнения второго условия был проделан расчёт собственных частот для двух простых моделей – диска (компоненты 4 и 5) и рабочей лопатки (компонент 2) – также с использованием программы конечноэлементного анализа LS-DYNA.



Модели, использованные при расчёте собственных частот

Демпфирование автоколебаний ротора расчётной модели

Полученные значения собственных частот приведены далее в таблице. Поскольку однозначно сказать, какие именно частоты необходимо использовать при задании демпфирования очень проблематично, то было использовано суммарно 12 собственных частот и, соответственно, 12 карт *DAMPING_RELATIVE. Они выделены цветом.

| Собственные частоты расчётной модели, состоящей из | | | |
|--|-------------|-----------------|-------------|
| диска | | рабочей лопатки | |
| Номер | Частота, Гц | Номер | Частота, Гц |
| 1 | 951 | 1 | 1947 |
| 2 | 1702 | 2 | 4855 |
| 3 | 3058 | 3 | 7428 |
| 4 | 3101 | 4 | 8016 |
| 5 | 3755 | 5 | 9939 |
| 6 | 4674 | 6 | 12803 |
| 7 | 4765 | 7 | 14209 |
| 8 | 4801 | 8 | 15235 |
| 9 | 5128 | 9 | 16135 |
| 10 | 5229 | 10 | 17940 |

Критерий разрушения моделей материалов

Для всех моделей материалов, за исключением используемых для компонентов 10 и 11, был задан критерий разрушения. Также для модели материала, используемой для части диска (компонент 5) не задан критерий разрушения. В качестве критерия разрушения были использованы значения эффективной пластической деформации при разрушении (Effective plastic strain to failure). Эти значения приняты равными ресурсу пластичности материала p_f . Ресурс пластичности материала определяется по формуле

$$p_f = \ln \left(\frac{1}{1 - \psi} \right),$$

где ψ – относительное сужение при разрыве.

Величины относительного сужения при разрыве взяты из указанных в таблице ГОСТ'ов.

| Марка материала | ГОСТ | | Значения эффективной пластической деформации при разрушении, используемые в расчёте |
|----------------------------------|----------|----|---|
| Сплав ВТ8 | 26492-85 | 20 | 0,223 |
| Сплав ОТ4-1 | 26492-85 | 30 | 0,357 |
| Сталь 11Х11Н2В2МФ-Ш (ЭИ962-Ш) | 5949-75 | 50 | 0,693 |

Контакты между компонентами и общая информация о расчётной модели

В расчёте используется общий контакт между всеми компонентами (карта *CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE). При использовании данного контакта программа сама определяет зоны контакта. Также в расчёте используется контакт, соединяющий (склеивающий) рабочую часть рабочей лопатки (компонент 1) и её хвостовик (компонент 2) (карта *CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE). Хвостовики трёх лопаток (компонент 2) вставлены в пазы диска (компонент 4) и зафиксированы с помощью контрольных планок (контрольные планки объединены с диском). Соответственно при расчёте для этих компонентов используется общий контакт. Остальные рабочие части рабочих лопаток компрессора (компонент 3) имеют общие узлы с диском (контакт не требуется). Также и части диска (компоненты 4 и 5) имеют общие узлы. Внутренняя обечайка корпуса (компонент 7) и направляющие аппараты (компоненты 8 и 9) зафиксированы друг относительно друга благодаря пазам, имеющимся в исходной геометрии и сохранённым в расчётной модели, а также общему контакту между компонентами.

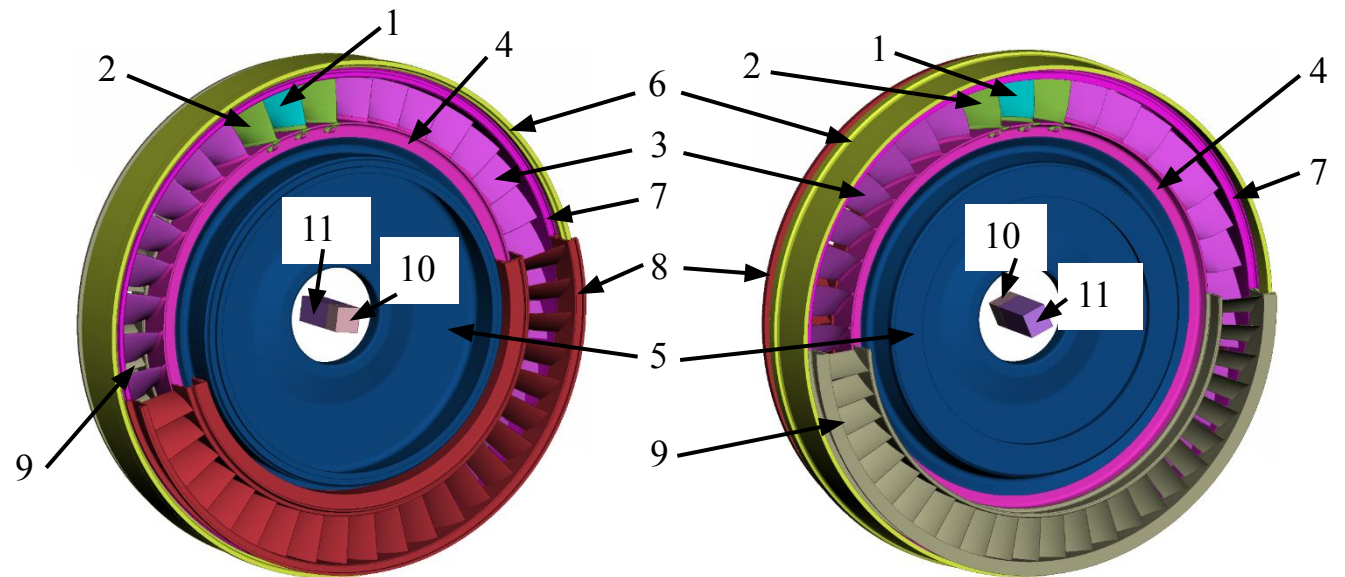
Общее расчётное время задачи – 1 мс.

Общее количество элементов в расчётной модели – 3552661.

Общее число узлов в расчётной модели – 1783349.

Общее время расчёта на компьютере (8-ми ядерный процессор AMD Ryzen 7 1700, 3ГГц; 64 ГБ оперативной памяти) – 24 часа 39 минут 35 секунд.

У всех используемых в расчётной модели элементов одна точка интегрирования на элемент.



Основные этапы расчёта

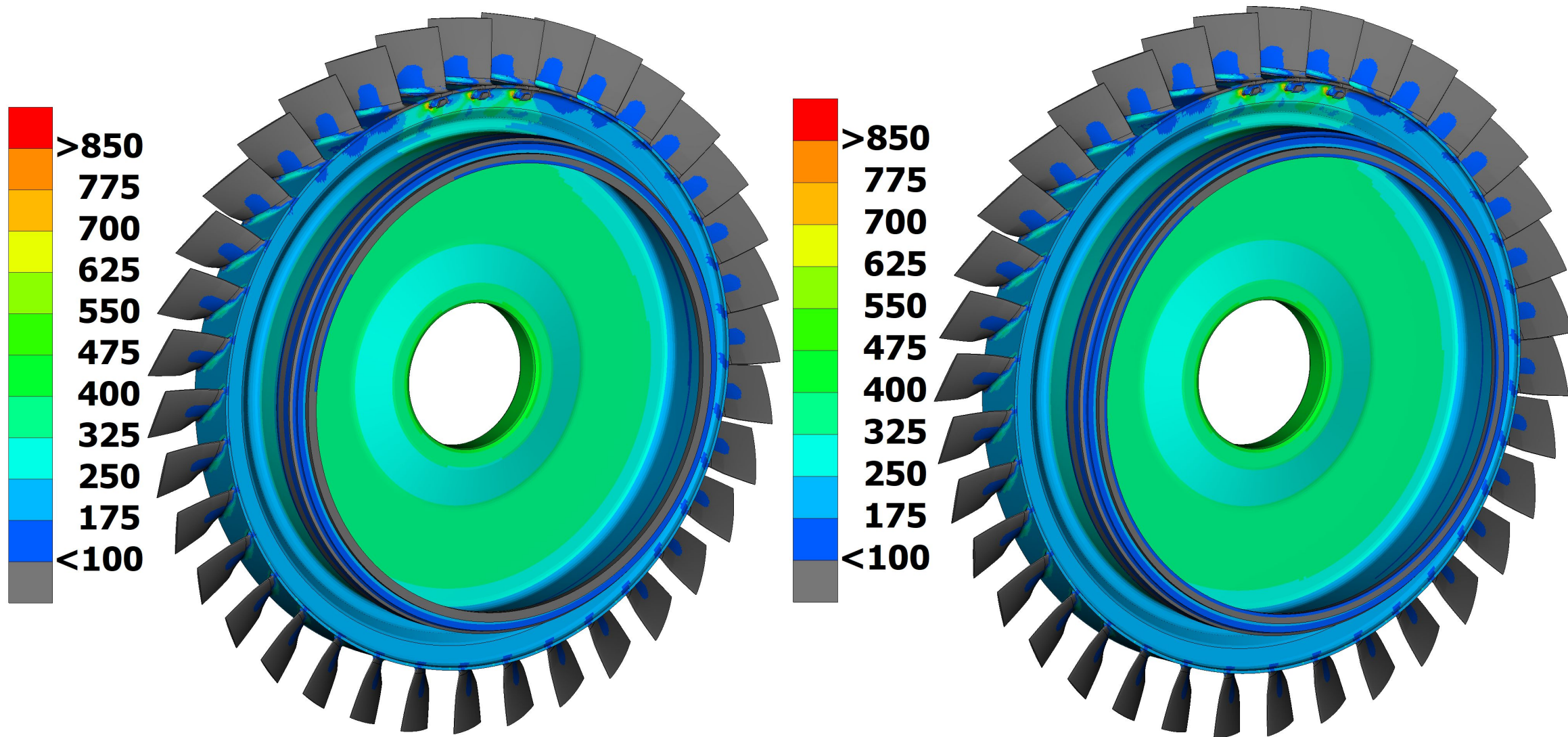
Расчёт можно разбить на три основных этапа:

1. В начальный момент времени к ротору расчётной модели прикладывается скорость вращения 3169 рад/с. Далее она поддерживается постоянной. Для подавления автоколебаний ротора используется карта *DAMPING_RELATIVE. Первый этап продолжается от момента времени 0 мс и до 0,25 мс.

2. На втором этапе расчёта демпфирование не используется. Ротор расчётной модели продолжает вращение со скоростью 3169 рад/с. Второй этап продолжается от момента времени 0,25 мс и до 0,3 мс.

3. Третий этап расчёта начинается после деактивации контакта между рабочей частью рабочей лопатки (компонент 1) и её хвостовиком (компонент 2). Далее рабочая часть лопатки под действием центробежных сил летит по направлению к корпусу и происходит удар. Третий этап продолжается от момента времени 0,3 мс и до окончания расчёта в момент времени 1 мс.

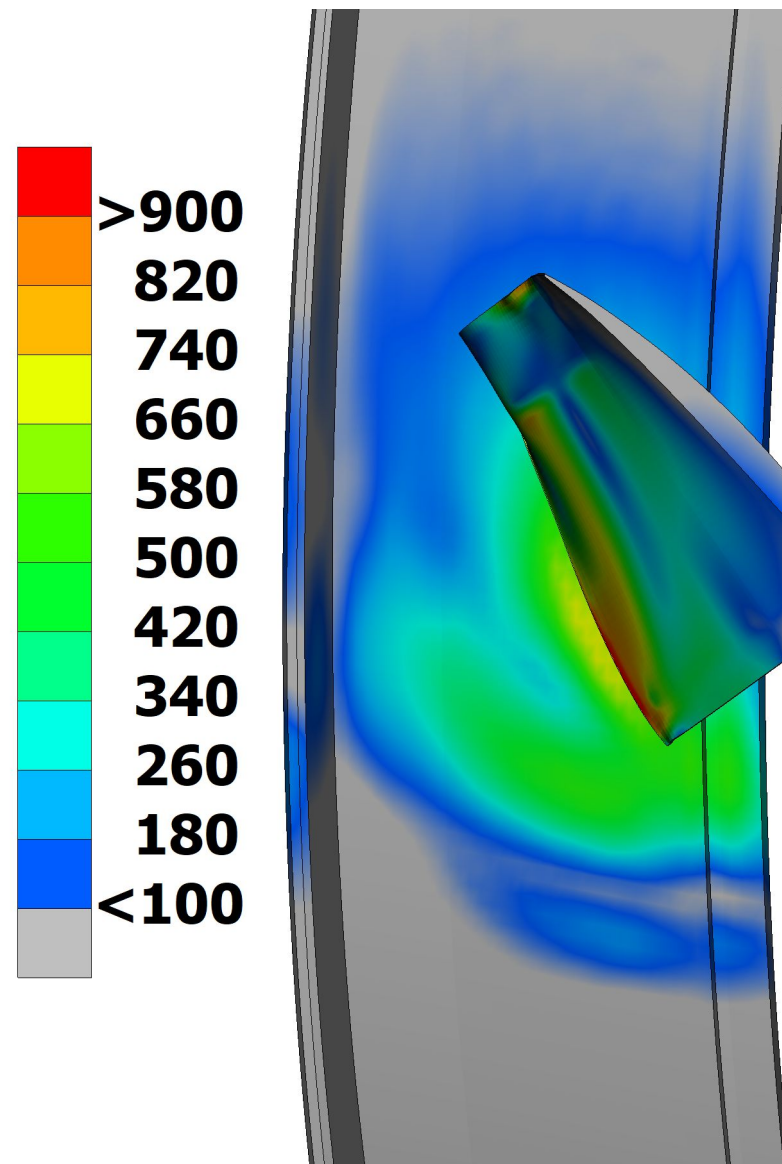
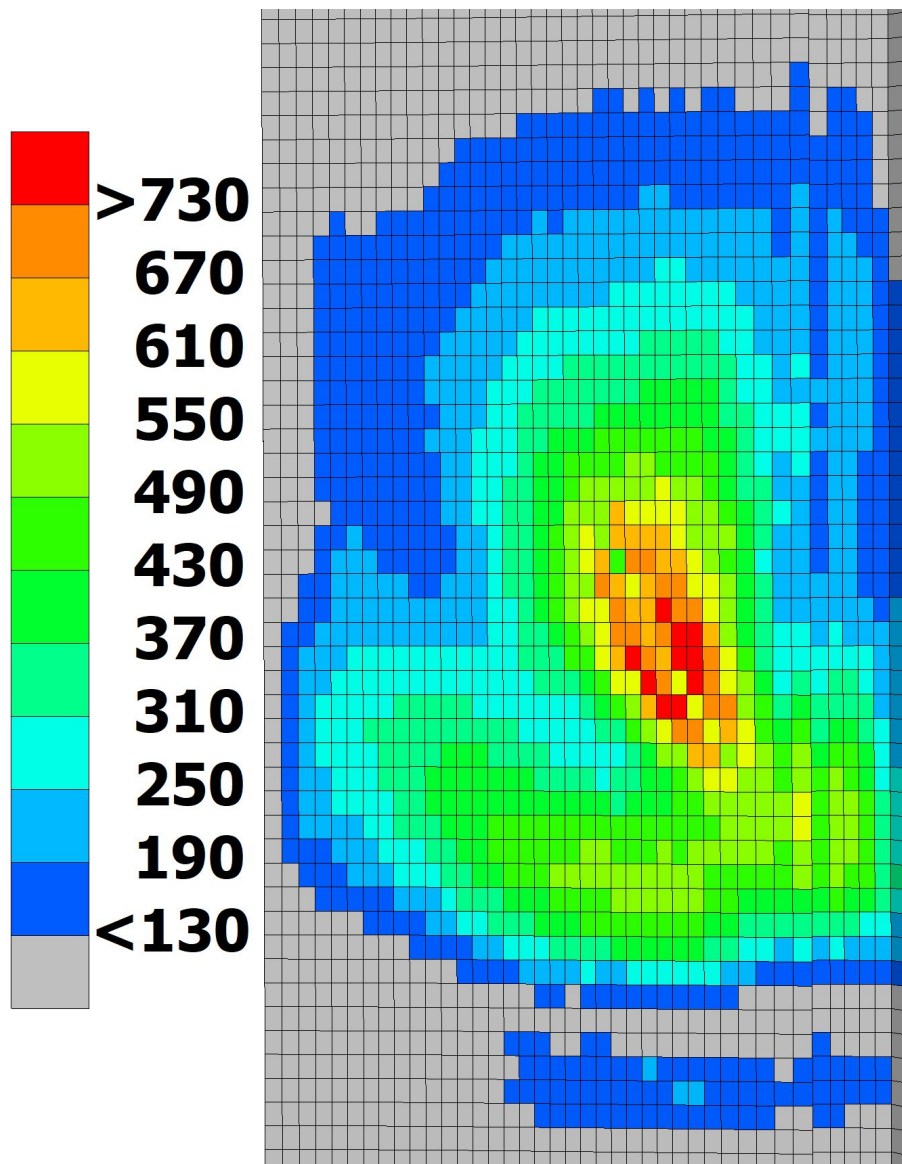
Результаты расчёта



Эквивалентные (по Мизесу) напряжения (в элементах) в моменты времени 0,25 мс (слева) и 0,3 мс (справа), МПа

Как можно видеть, колебания напряжений отсутствуют, а, следовательно, автоколебания ротора расчётной модели были полностью подавлены с помощью карт *DAMPING_RELATIVE.

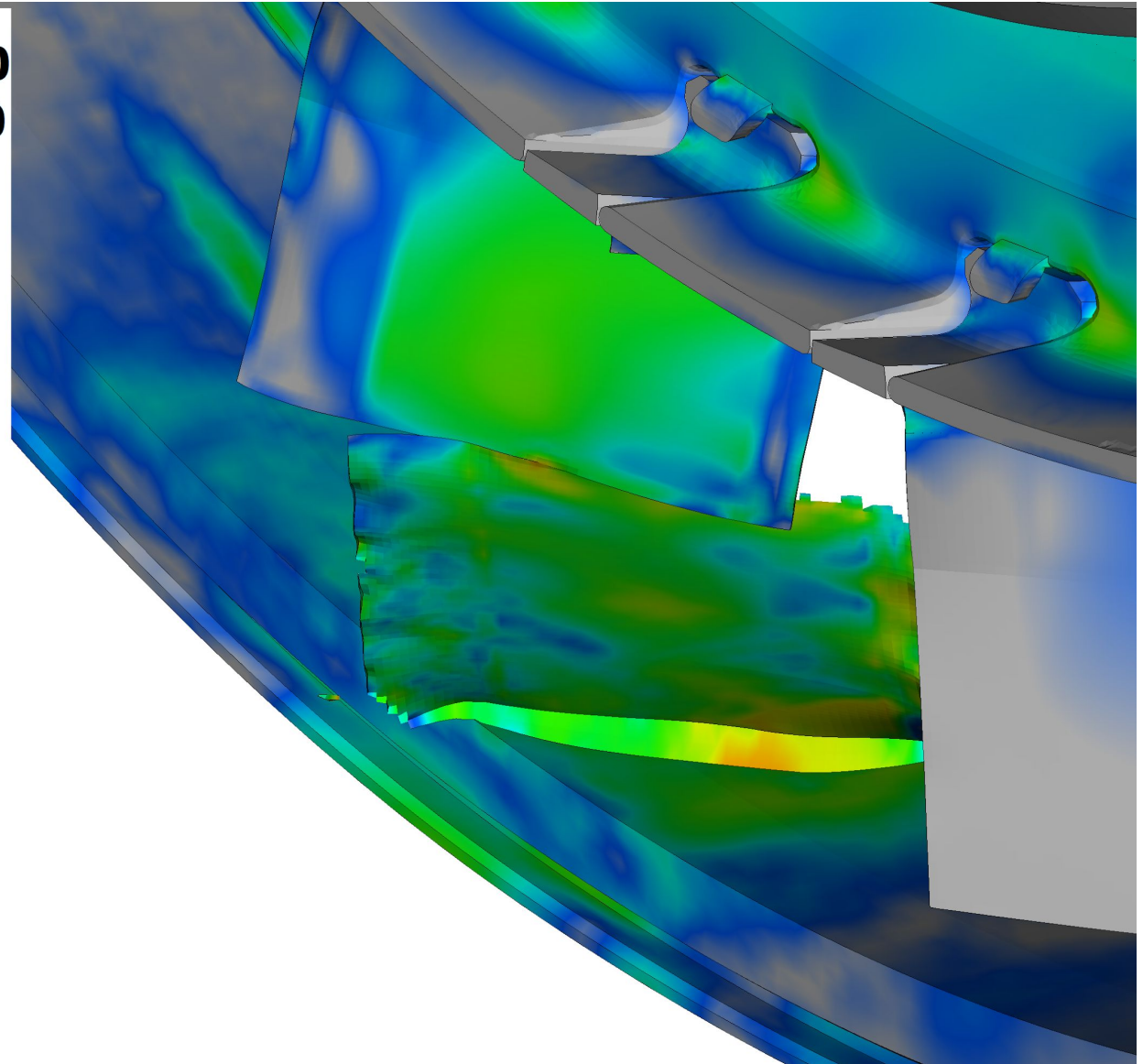
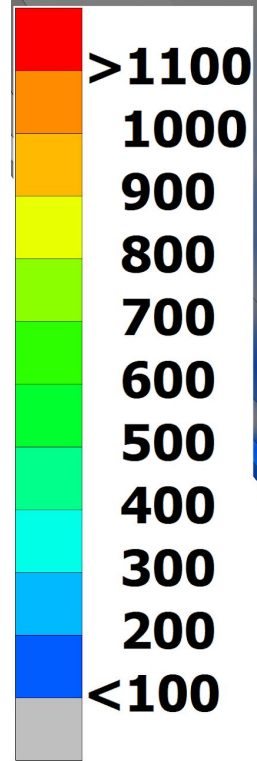
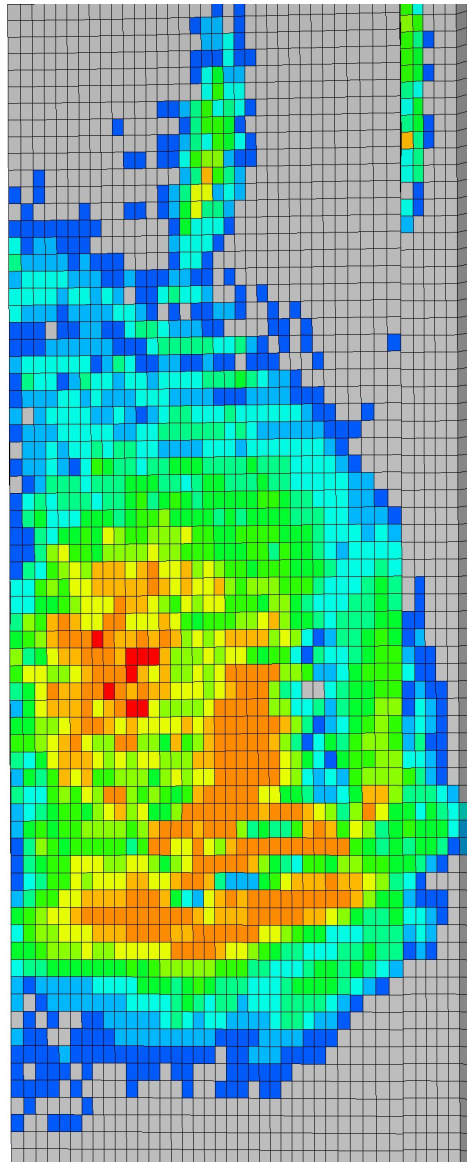
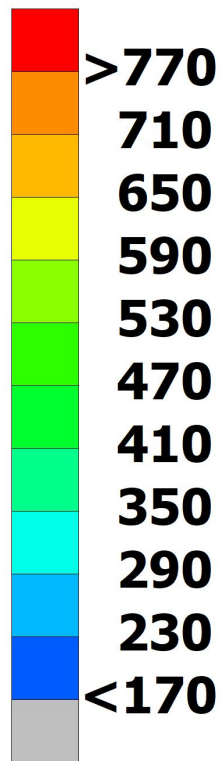
Результаты расчёта



У всех элементов, используемых в расчётной модели, одна точка интегрирования на элемент, и, соответственно, программа LS-DYNA определяет одно значение эквивалентного напряжения для всего элемента на каждом шаге расчёта. Далее через это значение и аналогичные значения в соседних элементах определяются напряжения в узлах элемента, что приводит к погрешностям. Поэтому напряжения на внутренней поверхности внутренней обечайки корпуса показаны здесь и далее в элементах, а не в узлах.

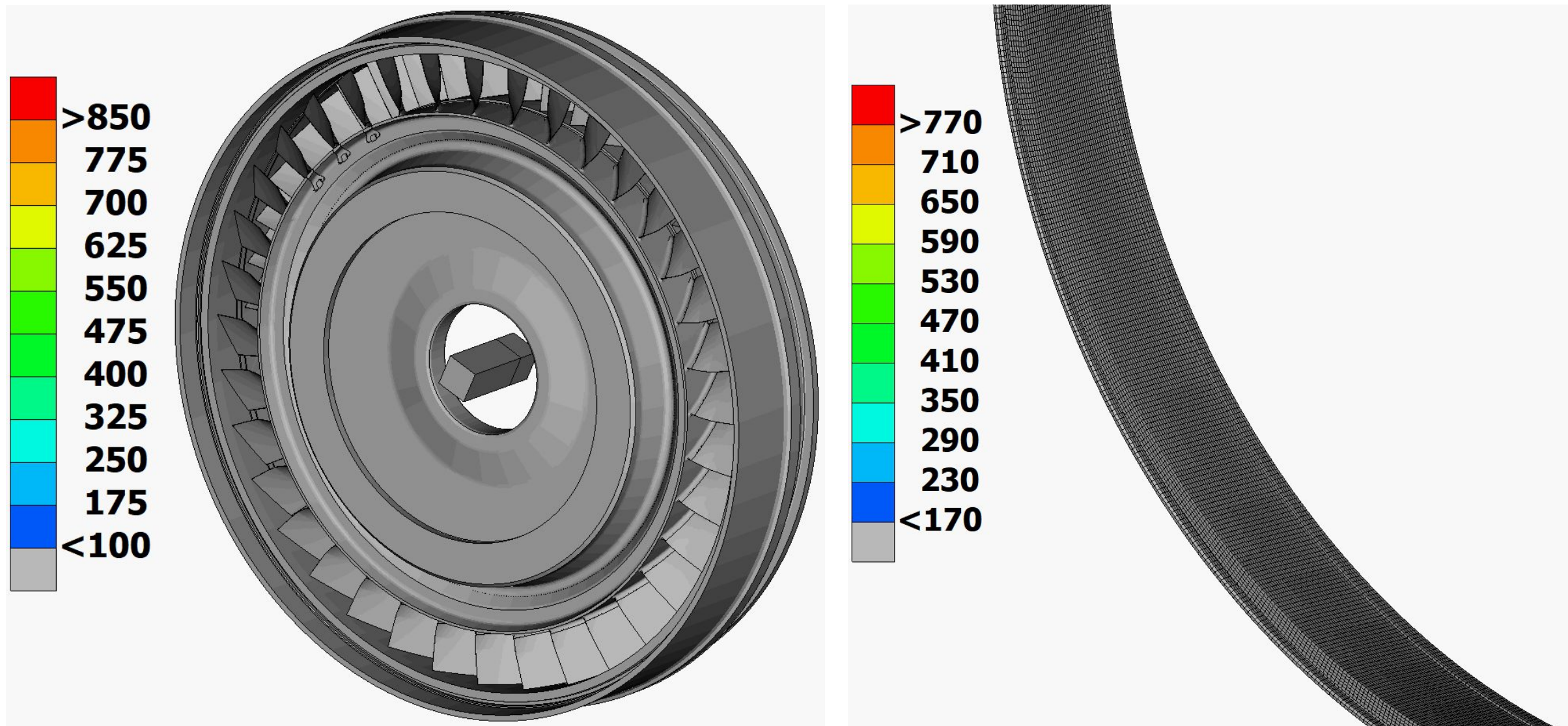
Эквивалентные (по Мизесу) напряжения (слева в элементах, справа в узлах) в момент удара рабочей части рабочей лопатки о корпус (0,345 мс), МПа

Результаты расчёта



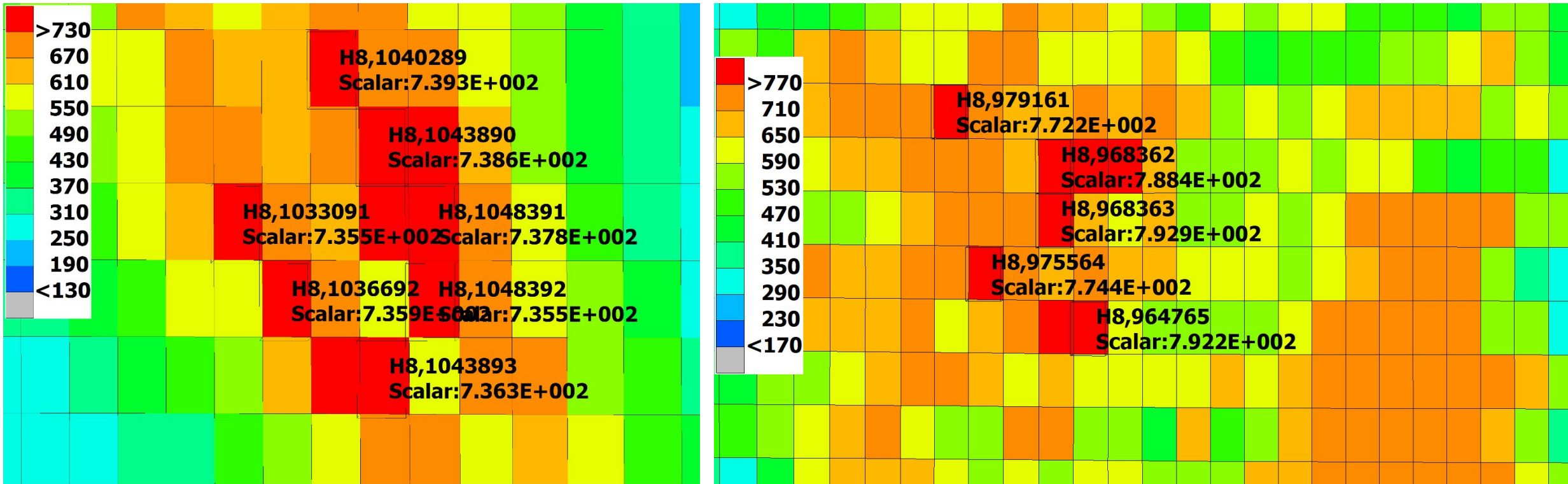
Эквивалентные (по Мизесу) напряжения (слева в элементах, справа в узлах) в момент повторного удара рабочей части рабочей лопатки о корпус (0,54 мс), МПа

Результаты расчёта



Эквивалентные (по Мизесу) напряжения (слева в узлах, справа в элементах), МПа

Результаты расчёта



Наибольшие значения эквивалентных (по Мизесу) напряжений в элементах в моменты удара (слева, 0,345 мс) и повторного удара (справа, 0,54 мс), МПа

Выводы

1. В момент удара лопатки о корпус наибольшие напряжения возникают на внутренней поверхности внутренней обечайки корпуса. Максимальное значение эквивалентных (по Мизесу) напряжений составляет 739 МПа, что незначительно больше предела текучести стали 11Х11Н2В2МФ-Ш (735 МПа) и меньше предела прочности (835МПа). Данные напряжения не могут привести к разрушению корпуса осевого компрессора.

2. В момент времени 0,54 мс рабочая лопатка, соседняя с оторвавшейся, ударяет её, что приводит к повторному удару рабочей части лопатки о корпус. Наибольшие напряжения также возникают на внутренней поверхности внутренней обечайки корпуса. Максимальное значение эквивалентных (по Мизесу) напряжений в этом случае составляет 792 МПа, что также больше предела текучести и меньше предела прочности. Поэтому данные напряжения также не могут привести к разрушению корпуса осевого компрессора.

3. Удары следующих лопаток об оторвавшуюся после повторного удара (вследствие пластического деформирования и разрушения части элементов последней) уже не приводят к появлению напряжений, превышающих предел текучести материала и потому также не могут привести к разрушению корпуса.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что корпус осевого компрессора выдержит удар рабочей части рабочей лопатки данной ступени осевого компрессора и вылета оторвавшейся лопатки за пределы корпуса не произойдёт.