



Прогнозирование усталостной прочности рабочих колес центробежных насосных агрегатов с помощью решений SIMULIA: Abaqus, fe-safe и комплекса гидродинамического анализа FlowVision

Сергей Тропкин, Азамат Девятов, Андерс Винклер, Резеда Тляшева, Марина Закирничная

Эксплуатация ответственного высоконагруженного оборудования часто выявляет ошибки, допущенные при проектировании данных конструкций. В частности, серьезным недостатком является игнорирование некоторыми производителями оборудования проведения расчетов на усталостную прочность и долговечность, а также отсутствие всесторонних ресурсных исследований создаваемых конструкций. Это может привести к разрушению элементов конструкций еще до достижения регламентных сроков эксплуатации и ремонта, и, как минимум, вызвать простой оборудования и остановку технологических цепочек производства, а в худших случаях — привести к возникновению аварийной ситуации. В данной статье авторы рассматривают современные подходы к решению задач усталости и долговечности на примере рабочего колеса центробежного насоса.

Центробежные насосные агрегаты (ЦНА) являются одним из самых распространенных видов роторных машин, эксплуатируемых на объектах нефтегазовой отрасли для перекачки различных нефтепродуктов и жидкостей. От надежности и долговечности работы центробежных насосов во многом зависит непрерывность технологических процессов и эффективность работы объектов нефтеперерабатывающих предприятий.

В процессе эксплуатации техническое состояние деталей насосных агрегатов, подвергаясь непрерывным разрушающим воздействиям,

постепенно ухудшается. Это является результатом влияния совокупности различных механических, физико-химических, технологических и эксплуатационных факторов, вследствие которого появляются дефекты и разрушаются детали насосов. При этом реализуется один или несколько механизмов накопления повреждений: циклический режим силового или температурного нагружения, коррозия, изменение структуры и механических свойств и пр. Накопленные в процессе эксплуатации повреждения достигают критического уровня, что приводит к нарушению работоспособности ЦНА, выработке детали ресурса, и как следствие, к ее поломке.

Известно, что в процессе реальной эксплуатации ЦНА разрушение рабочего колеса может происходить при гораздо меньшем времени наработки, чем это предписано рабочей документацией. Поэтому требуется создать методику, позволяющую определять режимы работы рабочих колес и оценивать, приведет ли выбранный режим эксплуатации к усталостному разрушению детали.

В различных исследованиях было установлено, что колебания режима работы ЦНА в процессе эксплуатации приводят к изменению гидродинамики потока жидкости, которая оказывает интенсивное динамическое воздействие на гидравлическую часть насоса. Учитывая, что рабочее колесо является основным и наиболее нагруженным элементом проточной части центробежного насоса, оно в первую

Сергей Тропкин

К.т.н., старший инженер, ООО «ТЕСИС».

Азамат Девятов

К.т.н., инженер кафедры технологических машин и оборудования, УГНТУ (Уфимский государственный нефтяной технический университет).

Андерс Винклер (Anders Winkler)

Ведущий технический специалист, Dassault Systemes EuroNordics AB.

Резеда Тляшева

Д.т.н., профессор кафедры технологических машин и оборудования, УГНТУ.

Марина Закирничная

Д.т.н., профессор кафедры технологических машин и оборудования, УГНТУ.

очередь воспринимает интенсивное динамическое воздействие пульсации потока, которое далее передается на подшипниковые узлы, корпус и фундаменты насоса. Динамическое воздействие пульсаций потока жидкости на вращающееся рабочее колесо в корпусе насоса приводит к его циклическому силовому и температурному нагружению, что влечет за собой накопление усталостных повреждений. Как правило, суммарный период развития усталостных трещин составляет 90-97% от общего срока службы изделия, а далее происходит быстрый рост трещины, приводящий к разрушению. Поэтому внезапное разрушение рабочего колеса из-за накопления усталостных повреждений в процессе эксплуатации представляет серьезную угрозу техническому состоянию насосного агрегата. На рис. 1 представлены поврежденные рабочие колеса после эксплуатации в среде тяжелых нефтепродуктов.

В настоящее время созданы и апробированы аналитические методы анализа усталостной прочности рабочих колес ЦНА, позволяющие с высокой достоверностью оценить период эксплуатации конструкции до ее полного разрушения. Однако ограничением данных методов является то, что они не позволяют определять интервалы зарождения усталостных трещин в конструкциях, а также не могут предложить решение для повышения усталостной прочности реальной конструкции.

Используя подходы, реализованные в исследованиях на основе аналитических методов [1], а также применяя современные численные



Рис. 1. Скол и усталостная трещина на колесе насосного агрегата

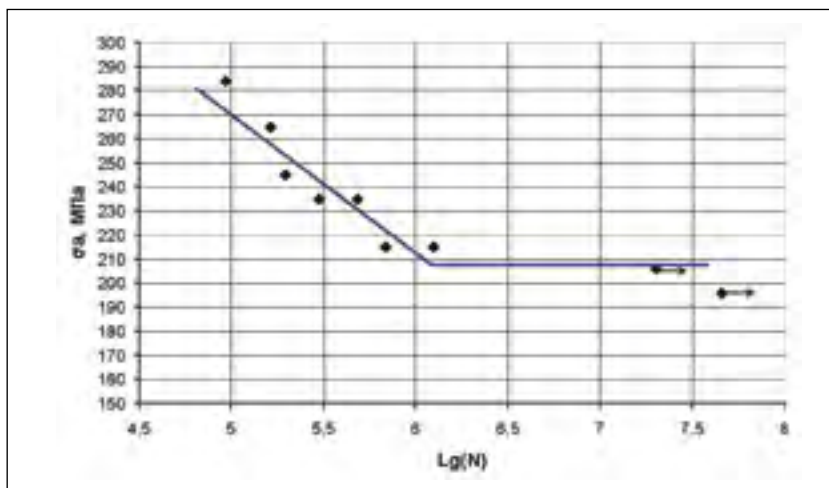


Рис. 2. Кривая усталости образцов из стали 25Л

методы решения задач гидродинамики, прочности и усталости, возможно предложить алгоритм решения задачи усталостной прочности. Данный алгоритм позволяет не только эффективно оценивать период эксплуатации деталей конструкции до полного разрушения, но и определять период эксплуатации конструкций до зарождения усталостных трещин, в том числе с учетом различных геометрических параметров детали, применяемых технологических решений, а также различных величин действующих нагрузок. Предлагаемые алгоритмы решения могут существенно повысить качество и конкурентоспособность создаваемых изделий, а также позволить максимально сократить число создаваемых прототипов конструкций.

Для анализа усталостной прочности конструкции необходимо проведение исследований механических свойств материала, таких как предел прочности, предел текучести и предел выносливости. Обязательным фактором является наличие экспериментальных данных по пределу выносливости материала. В частности, на основе ГОСТ 25.502-79 должна проводиться серия экспериментов по определению кривой усталостной прочности (рис. 2). Для некоторых распространенных типов материалов данные о пределе выносливости можно найти в справочной литературе.

Алгоритм решения задачи об усталостной прочности центробежных колес состоит из четырех шагов:

1. Построение трехмерной геометрической модели в САД-системе.
2. Определение гидродинамических нагрузок, действующих на рабочее колесо ЦНА, с помощью программного комплекса FlowVision.
3. Определение напряженно-деформированного состояния рабочего колеса с помощью программного комплекса Abaqus.
4. Расчет усталостной прочности колеса с помощью программного комплекса fe-safe.

При создании геометрической модели в САД-системе желательно изначально ее параметри-

зовать, что позволит легко изменять конфигурацию конструкции. Выполнение данного условия крайне удобно в том случае, когда изделие находится на этапе проектирования и окончательная его конфигурация еще не выбрана.

При отсутствии САД-пакета параметризованную модель для предложенного типа конструкции можно создать в пре-постпроцессоре Abaqus/CAE, который позволяет получать параметризованные геометрические модели средней сложности.

Затем на основе созданной геометрической модели создается расчетная гидродинамическая модель в программном комплексе FlowVision.

FlowVision — комплексное многоцелевое решение для моделирования трехмерных течений жидкости и газа, созданное командой разработчиков компании «ТЕСИС» в тесном сотрудничестве с российскими и зарубежными научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями.

FlowVision основан на численном решении трехмерных стационарных и нестационарных уравнений динамики жидкости и газа (уравнения Навье-Стокса), которые включают законы сохранения массы, импульса и уравнения состояния. Для расчета сложных движений жидкости и газа, сопровождаемых дополнительными физическими явлениями, такими как турбулентность, горение, контактные границы раздела, пористость среды, теплоперенос и т.д., в математическую модель включаются дополнительные уравнения, описывающие эти явления.

В качестве исходных данных для гидродинамического расчета использовались следующие данные: скорость потока на выходе из насоса; температура перекачиваемой среды; физические свойства перекачиваемой среды в зависимости от температуры.

Проведение гидродинамических вычислений проточной части насоса в программном комплексе FlowVision позволяет определить характер нагружения и значения нагрузок. Установлено, что максимальное значение давления возникает в области присоединения лопатки на периферии диска рабочего колеса. Давление зависит от пространственного положения лопатки рабочего колеса в улитке и при вращении циклически изменяется. В результате анализа

ТЕСИС

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

3D TransVidia - трансляция и проверка качества 3D моделей

SIMULIA Abaqus - прочность

FlowVision - гидродинамика

DEFORM - обработка металлов давлением

AutoForm - листовая штамповка

www.thesis.com.ru www.flowvision.ru

Тел/Факс: (495) 612 - 4422, 612 - 4262

E-mail: info@thesis.com.ru

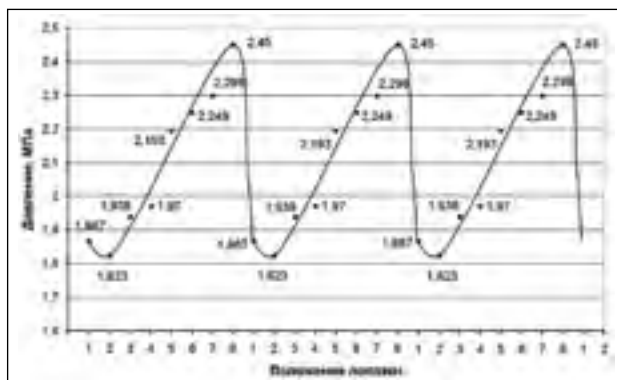
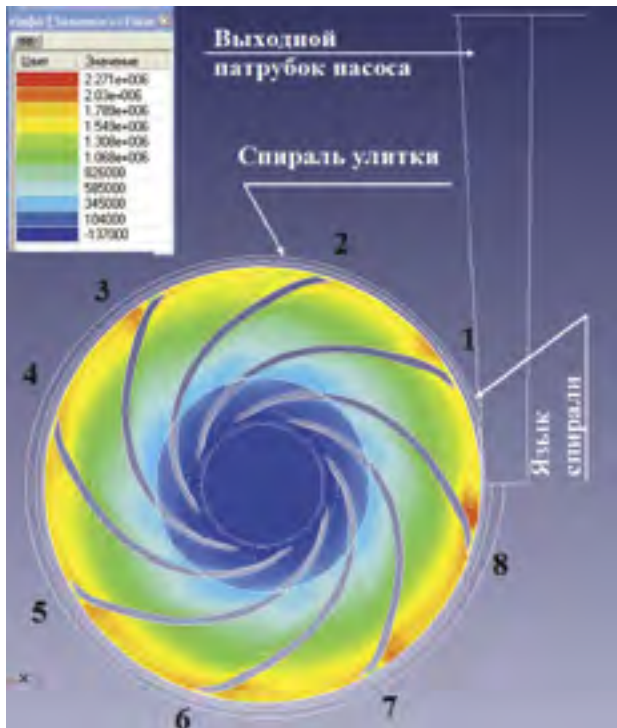


Рис. 3. График и картина распределения давлений на рабочем колесе при скорости подачи продукта перекачивания 44,9 м³/ч и температуре 324 °С

данных гидродинамического расчета уставлен циклический характер температурного и силового нагружения рабочего колеса (рис. 3), приводящий к накоплению усталостных повреждений.

Таким образом, в результате гидродинамических расчетов в FlowVision было установлено, что максимальное значение давления для материальной точки в области присоединения лопатки на периферии диска рабочего колеса зависит от его пространственного положения в улитке и изменяется циклически при вращении колеса. Полученные значения давления использовались для дальнейших расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) рабочего колеса в программном комплексе Abaqus.

Программный комплекс SIMULIA Abaqus компании Dassault Systemes — универсальный конечно-элементный комплекс прочностного и междисциплинарного анализа, позволяющий учитывать самые сложные нелинейные аспекты поведения конструкции, такие как сложное механическое поведение материала, геометрические нелинейности, контактные взаимодействия и пр.

Построенной в пре-постпроцессоре Abaqus/CAE геометрической модели были присвоены упругопластические свойства стали 25Л, а также

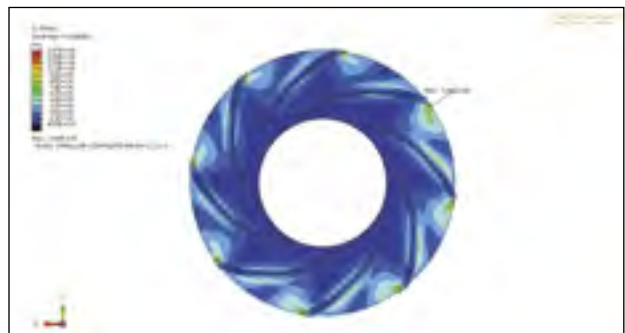


Рис. 4. Распределение напряжений в продольном сечении колеса

величина ее плотности. На основе распределения давлений, полученных в FlowVision, было создано аналитическое выражение распределения давления, которое прикладывалось к лопаткам рабочего колеса. Предполагалось, что рабочее колесо закреплено по внутреннему ободу.

В расчете учитывалось влияние центробежных сил. Вращение диска и соответствующее изменение давления на лопатках было имитировано с помощью инструмента Abaqus — расчетных шагов. На каждом из шагов изменялись значения давлений для лопаток — таким образом, за восемь расчетных шагов определялось НДС колеса во всех возможных положениях.

Анализ НДС рабочего колеса в программном комплексе Abaqus показывает, что максимальные напряжения возникают на периферии диска колеса в области примыкания лопаток (рис. 4). Полученные результаты подтверждаются расположением трещин, возникающих в процессе эксплуатации. Данные результатов анализа НДС используются для определения характера и параметров циклов изменения максимальных напряжений в области присоединения лопатки к дискам рабочего колеса для исследованного периода эксплуатации ЦНА.

По результатам проведенного расчета можно сделать заключение о том, что действующие напряжения гораздо ниже предела текучести, а следовательно, необходимо производить дальнейшие исследования в области усталостной прочности.

В ранее проведенном исследовании [1] расчет усталостной долговечности производился с помощью уравнения повреждений силового типа для условий многоциклового нагружения с введением поправочной функции отношения эксплуатационных и расчетных данных:

$$N_p = 10^{0,05 \cdot \sigma_{\max} - 11,54} \cdot \left[\frac{A}{K \cdot \sigma_a} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right) \right]^m$$

В результате получена зависимость времени наработки на отказ рабочего колеса из стали 25Л от подачи насосного агрегата при перека-

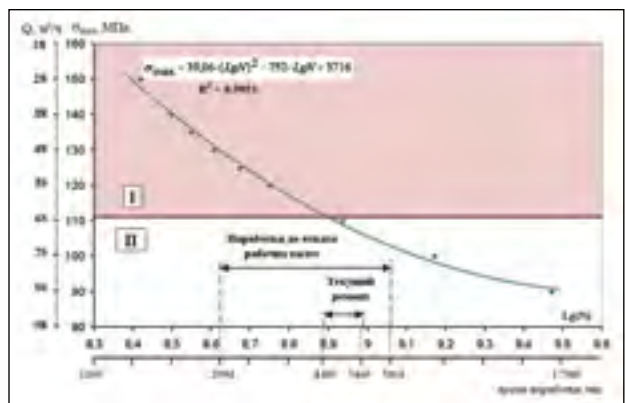


Рис. 5. Зависимость времени наработки на отказ рабочего колеса от подачи ЦНА при перекачке тяжелых нефтепродуктов: I — недопустимая область подач при эксплуатации насосного агрегата; II — рекомендуемая область подач при эксплуатации насосного агрегата



Рис. 6. Алгоритм проведения анализа в fe-safe

К основным трудностям при проведении анализа на усталостную прочность относятся:

- получение достоверных свойств материалов;
- учет факторов производственного процесса:
 - свойства материалов различаются в каждой производственной серии,
 - шероховатость поверхности различается на различных поверхностях детали,
 - наличие остаточных напряжений в случае изготовления детали способом литья;
- определение истинных значений для цикла нагружения и создание соответствующего его представления при проведении анализа усталостной прочности;
- понимание степени нагружения конструкции в реальности.

Во многих случаях для получения результатов, близких к экспериментальным, требуется учет всех указанных выше особенностей конструкции. Программный комплекс fe-safe позволяет учитывать их все в рамках одного расчетного случая.

Рассмотрим полученные ранее зоны концентрации напряжений на основе критерия Мизеса на рабочем колесе ЦНА (рис. 7). Зоны концентрации напряжений находятся на некотором расстоянии от зоны стыка лопатки с диском колеса.

Программный комплекс fe-safe предсказывает появление трещины в зоне соединения лопатки с диском, а не в зоне концентрации напряжений, что соответствует расположению трещины, наблюдаемой на реальной конструкции.

В результате проведения исследования было установлено, что за-

живании тяжелых нефтепродуктов (рис. 5), где каждая точка кривой соответствует стационарному режиму работы ЦНА и соответствующей ей долговечности рабочего колеса.

В результате проведенного исследования усталостной долговечности получены результаты, хорошо совпадающие с реальными эксплуатационными данными. Так, известно, что наработка колес до отказа составляет от 2094 до 5806 ч. Полученные результаты показывают, что при уровне напряжений в рабочем колесе, превышающем 110 МПа, возможно усталостное разрушение конструкции.

Это, однако, не позволяет оценить время наработки рабочего колеса до образования усталостной трещины. Знание времени наработки детали до зарождения усталостной трещины позволяет задать время проведения текущего ремонта детали до того, как она разрушится.

Подобное исследование позволяет выполнить программный комплекс fe-safe, входящий в линейку продуктов SIMULIA. Программный комплекс fe-safe был разработан компанией Safe Technology как средство анализа усталостной прочности на основе результатов конечно-элементного моделирования. Он разрабатывается в Великобритании с начала 1990-х годов и представляет собой первый коммерческий программный комплекс, основанный на современных методах анализа

многоосного деформированного состояния.

Основными особенностями программного комплекса fe-safe являются быстрота и точность проведения расчетов, легкость освоения интерфейса, комплексный подход к исследованию, а также доступная пользователям база данных свойств для более чем 350 видов материалов.

Программный комплекс fe-safe позволяет производить исследование долговечности с помощью современных алгоритмов анализа многоосного деформированного состояния. При этом возможен учет сложного характера циклов нагружения, анализ вероятностей зарождения трещины; анализ усталостной прочности чугунов, размещение виртуальных тензочувствителей на модели, анализ усталости в сварных швах в соответствии с BS5400/7608 и технологией Verity. Программа

позволяет производить анализ усталости от температурных воздействий, усталости, вызванной ползучестью материала, анализировать усталостную прочность композитных материалов, в том числе резин (рис. 6).

Для определения усталостной прочности на основе результатов конечно-элементного моделирования возможно применение следующих алгоритмов:

- критерий Brown-Miller с корректировкой средних напряжений — для пластичных металлов;
- критерий максимальных деформаций с корректировкой средних напряжений — для хрупких металлов;
- критерий Cast Iron с корректировкой средних напряжений — для чугунов;
- критерий Dang Van — для определения бесконечной долговечности.

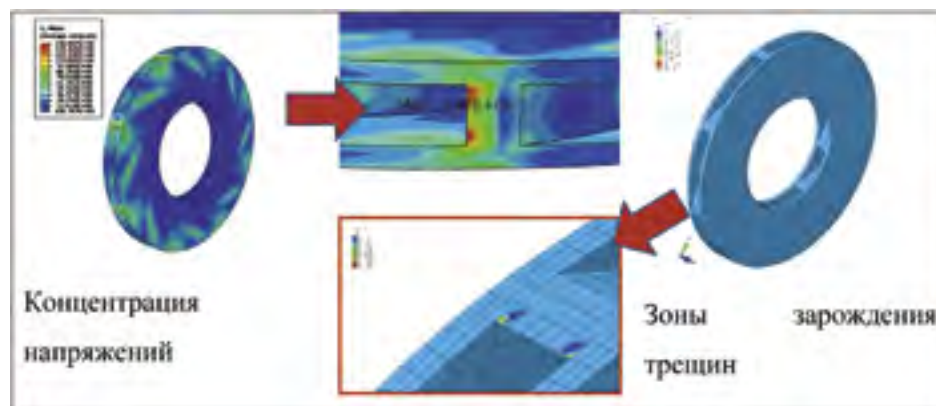


Рис. 7. Сравнение зоны концентрации напряжений с предсказанной зоной зарождения трещин

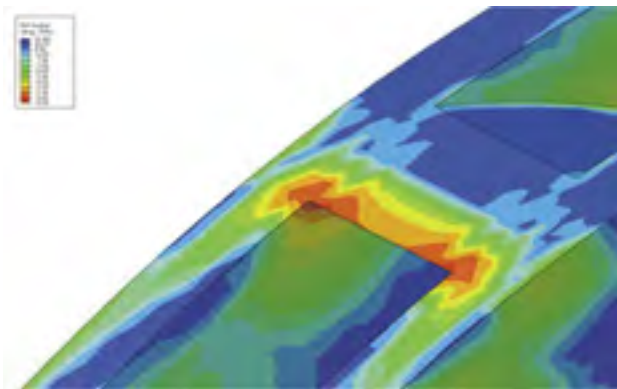


Рис. 8. FRF — коэффициент запаса по усталостной прочности

рождение трещины происходит гораздо раньше полного разрушения рабочего колеса — через 1754 ч, или 8,6 циклов в логарифмической шкале. Полученное значение хорошо совпадает с имеющимися статистическими данными по усталостному разрушению колес.

Необходимо оценить, насколько следует снизить напряжения, чтобы конструкция функциони-

ровала без образования трещин в течение заданного периода. Программный комплекс fe-safe обеспечивает быстрое и удобное определение этой величины. Для этого доступна переменная вывода FRF (Fatigue Reserve Factor — запас усталостной прочности). Данная переменная позволяет пользователю оценить, сможет ли выбранная деталь функционировать в течение

заданного периода эксплуатации. В нашем случае оценивалась возможность неограниченного функционирования без зарождения трещин — infinite life.

Значение FRF в зоне углов у основания лопаток составляет 0,774. Следовательно, деталь при текущей конструкции и заданной величине нагружения не удовлетворяет условию функционирования без трещинообразования (рис. 8).

Можно предложить следующие способы повышения усталостной прочности рабочего колеса:

- снижение величины действующих на деталь нагрузок путем изменения режима эксплуатации;
- модификация геометрических характеристик конструкции;
- использование другого типа материала с лучшими усталостными характеристиками.

Программный комплекс fe-safe позволил верно определить зоны зарождения трещин. Время рас-

чета усталостной прочности составило менее 2 мин.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование современных средств численного моделирования позволяет производить анализ функционирования конструкций при сложном режиме нагружения и получать результаты, близкие к эксплуатационным данным. На основе полученного инженерного решения можно модифицировать проект вновь создаваемой конструкции с целью повышения его качества и обеспечения для него конкурентных преимуществ. ■

Литература:

1. Девятов А.Р. Прогнозирование долговечности рабочих колес центробежных насосных агрегатов при перекачивании тяжелых нефтепродуктов.: Дис. канд. тех. наук. Уфа, 2010. 146 с.