

## Комплексный подход к исследованию и прогнозированию чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах

Обеспечение безопасности функционирования производственных объектов, представляющих особую опасность для окружающей среды и здоровья человека, является важнейшей задачей при их эксплуатации. Возрастающие масштабы ущерба от последствий чрезвычайных ситуаций на этих объектах и размеры затрат на их ликвидацию наносят прямой урон экономике страны. Важное место в системе мер, направленных на предотвращение техногенных катастроф, принадлежит методам своевременного прогнозирования, базирующимся на использовании современных вычислительных программных комплексов и одновременного мониторинга “слабых мест” посредством приборов неразрушающего контроля и диагностики.

### Краткая характеристика программного комплекса SIMULIA Abaqus

Программный конечно-элементный комплекс SIMULIA Abaqus это универсальная программа общего назначения, предназначенная для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного прочностного анализа.

SIMULIA Abaqus широко применяется для проектирования и расчетного анализа объектов нефтегазовой и нефтехимической отраслей во всем мире. SIMULIA Abaqus является безусловным лидером среди коммерческих программ по распространенности в нефтегазовой отрасли США, Канады и некоторых других западных стран. Среди пользователей системы такие компании, как Shell, DNV, Statoil, BP AMOCO, Schlumberger, Exxon Mobil Chemical, Chevron и др.

SIMULIA Abaqus позволяет рассчитывать сложное нелинейное напряженно-деформированное состояние конструкции и оценивать ее прочность и устойчивость с учетом многофакторного нагружения, в том числе теплового и взрывного нагружения.

К преимуществам данного программного комплекса относится также наличие большого круга нелинейных моделей материалов, в частности, материалов грунтов, пористых материалов и других, что позволяет эффективно и с большой точностью решать задачи, содержащие данные типы материалов, например, расчет прочности

подземных трубопроводов или задачи диффузии в пористых средах.

Среди спектра решаемых SIMULIA Abaqus задач следует отметить:

- ▶ расчет усталостной прочности и долговечности конструкций как под воздействием циклического, так и произвольного по времени нагружения с учетом пластичного состояния (рис. 1);
- ▶ оптимизация конструкций к изменению параметров, например, оптимизировать геометрию конструкции по напряжениям, возникающим в конструкции при заданных нагрузках;
- ▶ расчет конструкций, погруженных в воду с учетом различных типов нагрузок, таких как подводное течение, волнение на поверхности водоема, ветровые нагрузки и пр.;
- ▶ задачи трещинообразования, что особенно актуально в местах сварных соединений, местах концентратора напряжений и областях конструкции, находящихся под циклической нагрузкой;
- ▶ решение полностью связанных задач прочности и гидродинамики.

SIMULIA Abaqus является надежным, качественным программным продуктом с удобным интерфейсом.

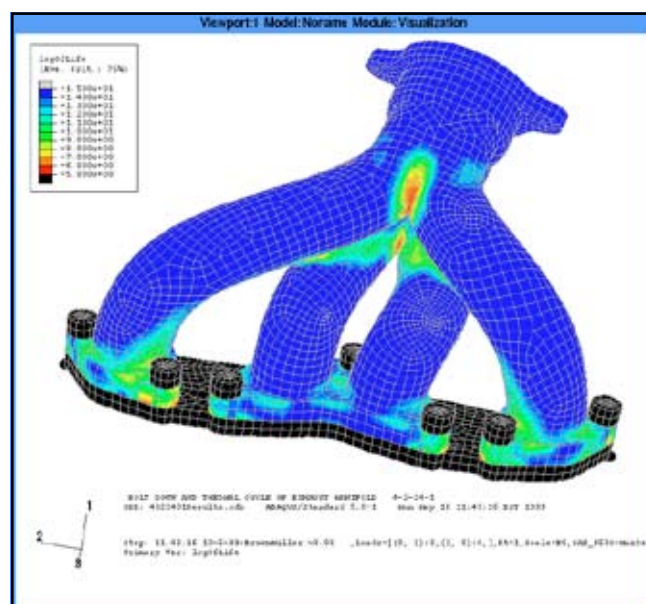


Рис. 1. Пример расчета усталостной прочности выхлопного коллектора

## Комплексный подход к исследованию поведения конструкций нефтяной промышленности

Резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов, трубопроводы и сосуды давлений относятся к категории объектов повышенной опасности, где предъявляются самые высокие требования на стадии их изготовления и обеспечения их безопасной работы в процессе эксплуатации. Возрастающее количество аварий на этих объектах связано с высоким уровнем изношенности конструкций, так как большой их процент выработал свой проектный ресурс. Последствия таких аварий могут приводить к человеческим жертвам, экологическим проблемам, остановкам технологического процесса на время устранения аварии, к огромным финансовым потерям.

Основными причинами, приводящим к авариям являются:

- ▶ повышенная пожаро-взрывоопасность хранимых продуктов;
- ▶ высокая скорость коррозионного износа;
- ▶ жесткие климатические условия: ураганный ветер, резкие перепады температур, сейсмические воздействия и др.;
- ▶ сложный характер нагружения конструкции в зоне уторного шва на примере резервуаров;
- ▶ повторно-переменный характер вследствие изменений внутреннего давления;
- ▶ вибрационное воздействие со стороны присоединенного оборудования и трубопроводов;
- ▶ изменение температуры при сменах режимов;
- ▶ агрессивность рабочей среды;
- ▶ многие другие причины.

Накопление повреждений в материале вследствие этих воздействий, а также возможное нарастание технологических дефектов могут приводить к уменьшению ресурса конструкций. Исследование поведения, в том числе и остаточного ресурса конструкций, должно опираться на достаточно полную и точную информацию об ее состоянии. Большая часть этой информации может быть получена экспериментальными диагностическими методами. Другая часть документируется в процессе эксплуатации. Эти источники информации являются необходимыми, но недостаточными: невозможно чисто экспериментальным путем выявить наиболее нагруженные зоны и определить напряжения в них – как из-за трудностей доступа (в частности к внутренней поверхности сосуда), так и из-за неопределенности положения нагруженных зон при вибрационном или тепловом нагружении. Только одновременное использование современных и надежных средств численного моделирования, таких как SIMULIA Abaqus и средств диагностики (приборы для неразрушающего контроля), позволит, с одной стороны, осуществлять достоверный контроль над критическими зонами конструкции при

различных нагрузках, а с другой стороны, оценивать ресурс долговечности конструкций при повреждениях.

Точное определение характеристик конструкции при диагностировании позволит дать достоверное заключение о ресурсе конструкции при использовании методов численного моделирования, таких как SIMULIA Abaqus.

В свою очередь, численное моделирование реального поведения конструкций при реальных нагружениях позволит выявить наиболее критические зоны конструкции, где необходимо осуществлять постоянный контроль с использованием приборов для неразрушающего контроля.



Рис. 2. Схема комплексного подхода к исследованию поведения конструкции

На рис. 2 приведена общая схема комплексного подхода к исследованию поведения конструкции.

## Использование диагностического оборудования

Одной из основных причин вывода объектов из эксплуатации в нефтяной промышленности является коррозия внутренней поверхности резервуаров и емкостей.

При обследовании резервуаров используется радиографический или ультразвуковой контроль. Радиографический контроль обладает малой чувствительностью к наиболее опасным – плоскостным дефектам. Потому дефекты типа трещин в большинстве случаев не могут быть выявлены. Главное, что радиационный контроль может быть проведен только в период ремонтных работ, то есть резервуар должен быть освобожден от нефтепродуктов.

Ультразвуковой контроль обладает высокой чувствительностью к обнаружению наиболее опасных дефектов типа трещин и может быть проведен на объекте, находящимся в эксплуатации. Обследование на степень коррозионного износа также не вызывает каких-либо трудностей.

Существующая в настоящее время практика ручного ультразвукового контроля очень часто не удовлетворяет требованиям инспекционного надзора. Достоверность результатов при ручном контроле зависит в первую очередь от квалификации и субъективных факторов оператора-дефектоскописта, соблюдения им технологии контроля, применяемой аппаратуры и т.д. При ручных методах контроля при обследовании

резервуаров на коррозионный износ используют только выборочный контроль, не дающий полной информации о состоянии объекта. Наибольшую опасность вызывает местная или питтинговая коррозия, которая не выявляется при ручном выборочном контроле. Существенным фактором является то, что в некоторых случаях инспекционный контроль может быть проведен только в рамках ремонтных или регламентных работ с остановкой оборудования на несколько дней или часов, что недостаточно для качественного проведения обследования из-за больших объемов работ, низкой производительности и достоверности ручного контроля.

Всех вышеперечисленных недостатков можно избежать только при использовании полностью автоматического контроля, по результатам которого составляется документация об имеющихся дефектах, которая позволяет оценить реальное состояние объектов.

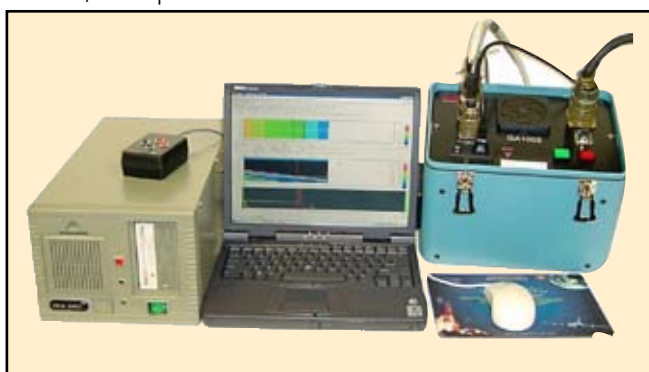


Рис. 3. Портативная переносная установка для автоматического ультразвукового и вихретокового контроля серии IntraSpect/UX

Фирма AMDATA (США), занимает одно из лидирующих мест в разработке и производстве портативных переносных установок для автоматического ультразвукового и вихретокового контроля серии IntraSpect/UX (рис. 3).

Системы позволяют легко перейти от малопроизводительного и выборочного ручного контроля к автоматизированному контролю, определяющему любые дефекты в сварных швах и основном материале, остаточную толщину стенок, язвенную, ручейковую и канальную коррозию на поверхностях различной геометрической формы и размеров в любых пространственных положениях. Получение данных производится в реальном масштабе времени. Все системы IntraSpect обеспечивают высокоскоростное сканирование, сбор данных, повторяемость результатов, постоянное хранение RF-данных и параметров настройки, последующий вызов накопленных данных и анализ, изменение параметров настроек без повторного сканирования, печать результатов, снижение общего времени обследования (одновременный сбор и обработка данных) и выдачи результатов контроля. Возможность проведения контроля с очень малым шагом сканирования (до 0,2 мм и меньше) при высокой общей точности позиционирования от начальной точки отсчета, позволяют проводить контроль особо ответственных изделий с выявлением дефектов очень малых размеров.

Наиболее характерные примеры применения систем AMDATA в нефтехимической и газовой промышленности:

- ▶ обследование днищ и боковых стенок нефтехранилищ, резервуаров (сварные швы, основной металл, степень коррозионно/эрозионного износа, обнаружение язвенной и канальной коррозии) с наружной и внутренней поверхности;
- ▶ контроль технологических трубопроводов, ректификационных колонн;
- ▶ обследование котлов, сосудов высокого давления, ресиверов и др.;
- ▶ контроль магистральных трубопроводов (в том числе в зимнее время);
- ▶ проведение контроля в опасных для жизни человека местах.

Полностью автоматический контроль с применением установок фирмы AMDATA проводился на объектах предприятий АО «СН-Мегионнефтегаз», АО «ЛУ-Койл-Лангепаснефтегаз», «Самаратрансгаз» и «Приволжские магистральные нефтепроводы».

Так, для организации «Приволжские магистральные трубопроводы» проводилось обследование толщины днища хранилища топлива на предмет обнаружения остаточной коррозии. Обнаружены участки с недопустимой остаточной толщиной. Днище было признано подлежащим срочному ремонту. Во внутренней части хранилища в зоне приварки (уторный шов) боковой стенки к днищу (на расстоянии 40-50 мм по высоте) по всему периметру были обнаружены как отдельные, так и протяженные участки глубокой язвенной коррозии. Контроль проводился с наружной стенки. При номинальной толщине 13,5 мм, на исследуемом участке обнаружена зона с остаточной толщиной всего 3,6 мм (рис. 4).



Рис. 4. Боковая стенка хранилища топлива. Зона уторного шва. Номинальная толщина 13,5 мм. Имеются участки с минимальной остаточной толщиной 3,6 мм

Результаты измерений были полностью подтверждены при последующем визуальном контроле с измерением координат участков коррозии и остаточной толщины.

## Анализ поведения ректификационной колонны при воздействии ударной взрывной волны

В качестве примера рассмотрим поведение ректификационной колонны с использованием программного комплекса SIMULIA Abaqus при воздействии ударной взрывной волны, которая образуется при взрыве парогазовоздушно-



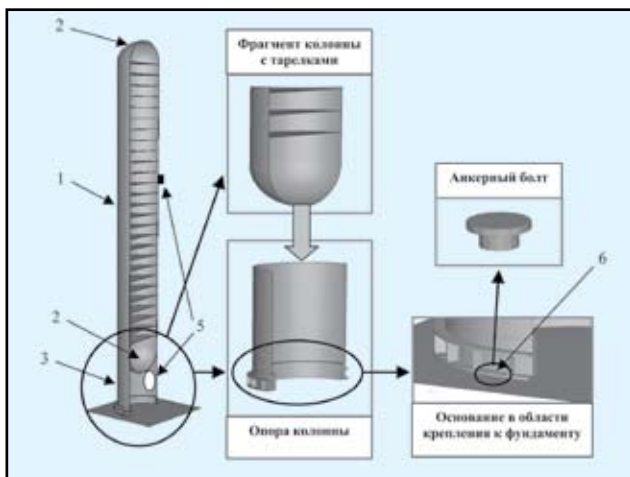


Рис. 5. Модель ректификационной колонны

го облака на некотором расстоянии от колонны. Помимо этого исследуется напряженно-деформированное состояние колонны до взрыва, при штатной эксплуатации.

Для решения поставленной задачи была смоделирована ректификационная колонна (рис. 5), состоящая из следующих элементов: корпус – 1, верхнее и нижнее эллиптические днища – 2, опора – 3, массообменные тарелки – 4, люки и штуцера – 5. Опора крепится к бетонному фундаменту с помощью анкерных болтов – 6.

При моделировании учитывалось нахождение кубовой жидкости в нижней части колонны, и жидкой фазы на массообменных тарелках.

Решение задачи проводилось в два этапа

На первом этапе проводилось исследование статического нагруженного состояния колонны с учетом рабочих условий эксплуатации, таких как температура, внутреннее давление, собственный вес и гидростатическое давление жидкости.

На втором этапе – динамическое поведение предварительно нагруженной колонны под действием фронта взрывной ударной волны. При этом результаты статического расчета были приняты в качестве начальных условий для расчета динамического воздействия.

Основные конструктивные параметры модели: диаметр колонны 4 м, высота 30 м, количество тарелок 27, толщина стенки колонны 18 мм, количество анкерных болтов 10. Болты равномерно распределены по периметру основания.

Учитывались упругопластические свойства материалов колонны и анкерных болтов, выполненных из стали.

В статическом расчете принимались следующие нагрузки, действующие в колонне:

- ▶ собственный вес конструкции. Эта распределенная нагрузка в SIMULIA Abaqus вычисляется автоматически при задании плотности материала и ускорения свободного падения;
- ▶ гидростатическое давление столба кубовой жидкости, P2. Высота столба жидкости 1,5 м. Эта нагрузка в SIMULIA Abaqus вычисляется автоматически при задании высоты столба жидкости и ее плотности;
- ▶ гидростатическое давление слоя жидкости, действующее на каждую тарелку, P1;

- ▶ внутреннее давление в колонне, величиной 2 Атм;
- ▶ температура верха колонны 850С;
- ▶ температура низа колонны 1740С. Температура на границе каждого отсека колонны задается по высоте по линейному закону;
- ▶ температура окружающей среды 200С;
- ▶ в расчете учитывались анкерные болты во взаимосвязанной системе.

Фундамент колонны закреплен по всем степеням свободы, на плоскости симметрии колонны задается условие симметрии, а нижняя грань анкерных болтов имеет закрепление по всем степеням свободы.

В модели задано условие контактного взаимодействия между фундаментом и основанием колонны, а также между анкерными болтами и основанием. Коэффициент трения в обоих случаях равен нулю.

Сетка конечных элементов создана в препроцессоре Abaqus/CAE. Использовались твердотельные объемные элементы первого порядка аппроксимации типа C3D8R. Общее количество элементов в модели 9492.

### Статика. Предварительно нагруженное состояние

Результаты численных экспериментов статического расчета приведены на рис. 6, где отображено распределение температур в материале колонны, распределение эквивалентных напряжений по III теории прочности, а также распределение перемещений.

Видно, что максимальные напряжения в колонне достигают 67 МПа, что не превышает предела текучести стали.

Максимальные перемещения достигаются в центре тарелок и составляют 4,2 см.

На рис. 7 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу вдоль образующей от верхней

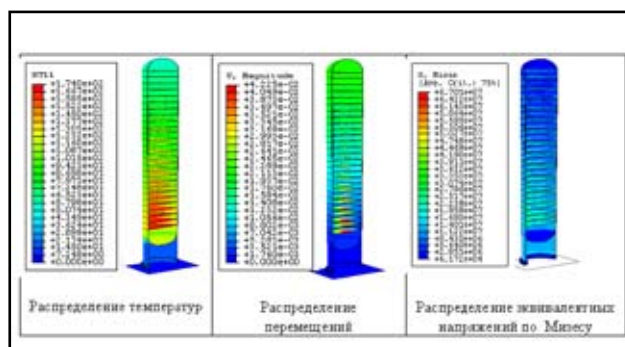


Рис. 6. Результаты статического расчета

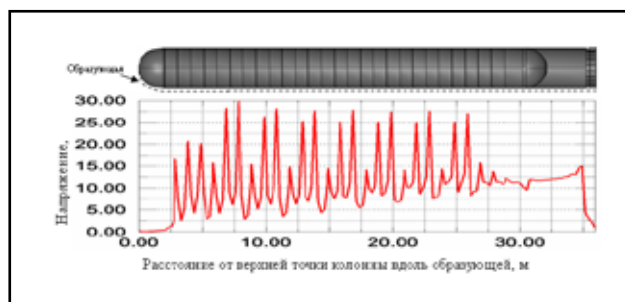


Рис. 7. Эквивалентные напряжения по III теории прочности по образующей от верхней точки колонны до фундамента

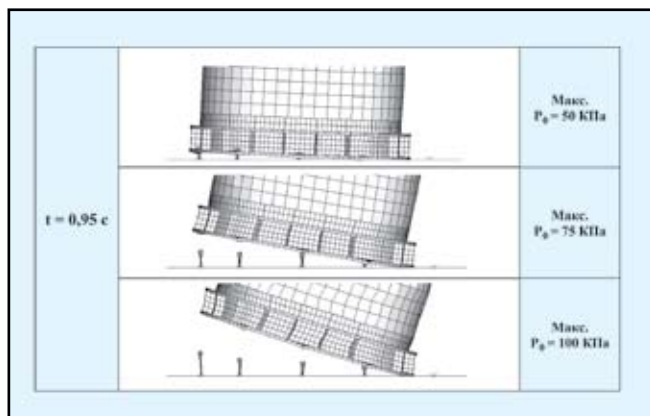


Рис. 8. Деформированное состояние колонны в области основания

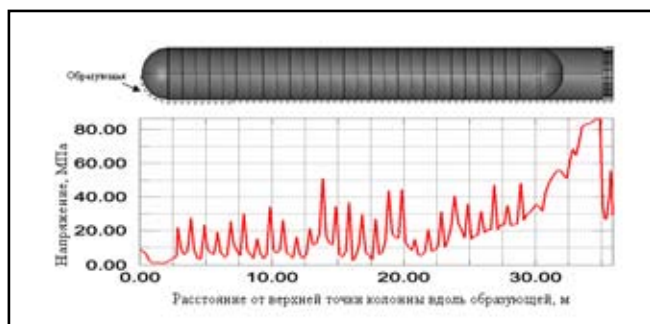


Рис. 9. Эквивалентные напряжения по III теории прочности вдоль центральной образующей от верхней точки колонны до фундамента. Время  $t = 1,5$  сек.,  $P_f = 50$  КПа

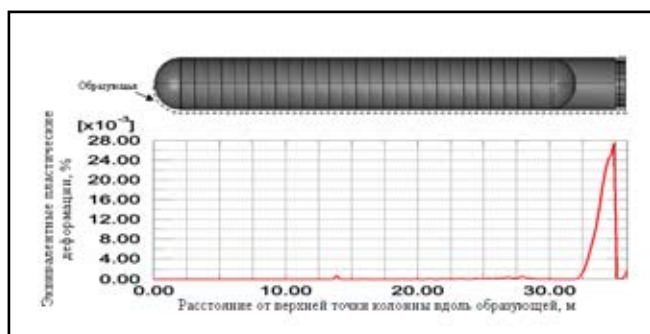


Рис. 10. Пластические деформации вдоль центральной образующей от верхней точки колонны до фундамента. Время  $t = 1,5$  сек.,  $P_f = 50$  КПа

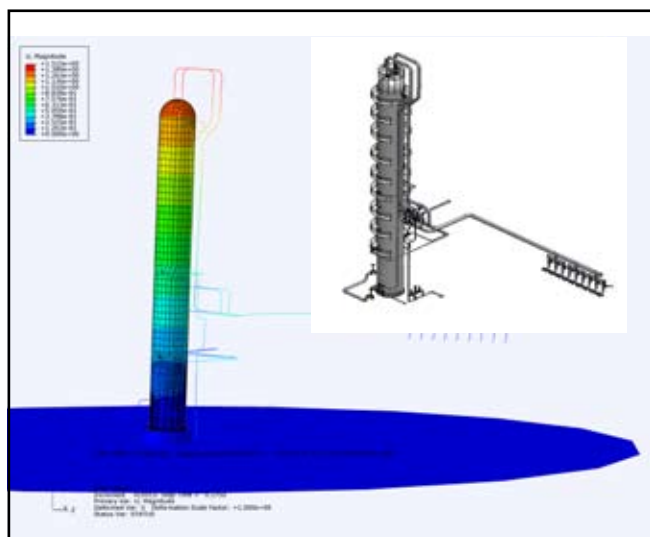


Рис. 11. Поведение ректификационной колонны с трубопроводной системой обвязки при воздействии ударной волны

точки колонны до фундамента. Наиболее напряженные места колонны – это места крепления тарелок к оболочке колонны, а также область крепления колонны к основанию.

## Динамика. Воздействие взрывной волны

Помимо начального условия в виде преднагружения, в динамических расчетах сохраняются все нагрузки и граничные условия с предыдущего статического расчета, а также появляется нагрузка от действия ударной волны в виде давления, максимальные значения которого во фронте волны при расчетах принимались равными 50, 75 и 100 КПа, а длительность воздействия ударной волны во всех трех вариантах составляла 0,02 сек.

На рис. 8 показано деформированное состояние колонны в области основания, в частности, можно наблюдать разрушение анкерных болтов, напряжения в которых превышают предел прочности.

В результате расчетов получено, что при давлении в 50 КПа не происходит падения колонны. При давлении в 75 КПа колонна теряет устойчивость и опрокидывается, но с меньшей скоростью, чем при давлении в 100 КПа.

На рис. 9 и 10 показано распределение эквивалентных напряжений по III теории прочности и эквивалентных пластических деформаций соответственно вдоль образующей колонны от верхней точки колонны, до фундамента в момент времени  $t = 1,5$  с, для варианта с максимальным давлением на фронте волны  $P_f = 50$  КПа. Видно, что наибольшие напряжения и пластические деформации достигаются в нижней части основания колонны.

На рис. 11 представлено поведение ректификационной колонны с трубопроводной системой обвязки при воздействии ударной волны.

## Заключение

В статье был представлен комплексный подход к прогнозированию чрезвычайных ситуаций на примере проектирования и эксплуатации конструкций нефтяной промышленности, оценке остаточного ресурса при штатных и аварийных нагрузках. Следует отметить, что только одновременное использование современных и надежных средств численного моделирования, таких как SIMULIA Abaqus и диагностики (приборы для неразрушающего контроля) позволит, с одной стороны, осуществлять достоверный контроль над критическими зонами конструкции при различных нагрузках, а с другой – оценивать ресурс долговечности конструкций при повреждениях.

**С. А. Рыжов, к.ф.-м.н., начальник отдела систем проектирования и инженерного анализа,**  
**С. Н. Тропкин, инженер отдела систем проектирования и инженерного анализа,**  
**И. В. Канарейкин, к.т.н., начальник отдела неразрушающих методов контроля и диагностики,**  
**компания "ТЕСИС"**