

Эластомеры и полимерные композиции для нефтепромыслового оборудования. Проблемы и возможности.

ООО «РЕАМ-РТИ»,

Пятов И.С., Тихонова С.В., Салимон А.И., Воробьева Л.В., Лунев В.В., Фомичева Л.Э.

Нефтепромысловое оборудование в современном исполнении содержит значительное количество деталей из эластомеров (уплотнения, подшипники, демпфирующие устройства, обрезиненные рабочие органы насосов). Существует тенденция замены ряда традиционных компонентов из металлов на полимерные композиции (например, детали ступеней центробежных насосов, газосепараторов, подшипники скольжения).

В обоих случаях изготовители оборудования и предприятия, оказывающие услуги по ремонту и эксплуатации (сервисные компании), должны иметь достоверную информацию о реальных осложненных условиях добычи и транспортировки нефти и газа, а также знать возможности, как избежать отказа или снижения работоспособности эластомерных уплотнений и компонентов, изготовленных из полимерных композитов.

Отказы этих изделий, удельная цена которых в стоимости изделий редко превышает 1-2%, часто приводят не только к снижению эффективности добычи и транспортировки углеводородного сырья, но и к авариям, последствия которых в тысячи раз в стоимостном выражении выше стоимости качественных уплотнений.

Особенности окружающей среды

В России, также как и в других нефтегазодобывающих государствах, основные разведанные и доказанные запасы углеводородного сырья залегают на больших глубинах (более 1000 м), их добыча сопровождается борьбой с обводненностью нефти, с газовыми факторами, парафино- и солеотложениями на рабочих органах и трубопроводах, большим количеством выносимых мехпримесей. Во многих случаях добываемое углеводородное сырье попутно содержит более 2% серосодержащих веществ, самым значимым по агрессивной активности среди которых является сероводород (H_2S).

Стремление к интенсификации добычи нефти часто приводит к применению химически активных веществ, например, кислот, аминосодержащих средств, различных ПАВов и других реагентов.

Как известно широкому кругу специалистов, извлечение насосами мультифазных сред и их транспортировка усугубляет гидродинамическую и температурную обстановку на входе в насосные установки, в арматуре и трубопроводных системах. Прежде всего, нестабильность давлений и температур мультифазных сред (скоростные изменения этих показателей) приводит к проблеме кессонной стойкости полимеров, в первую очередь эластомеров, из которых изготавливаются многообразные уплотнения, диафрагмы гидрозащиты, сифоны торцовых уплотнений.

Детали из эластомеров для погружного оборудования

Перечисленные факторы позволяют применительно к уплотнительным деталям из эластомерных материалов сформулировать ряд требований, которые, к сожалению, не являются исчерпывающими, так как каждый узел имеет свои особенности конструкции и эксплуатации. При этом имеется в виду, что современное нефтегазодобывающее оборудование (при правильном подборе к скважинным условиям и сервисе) должно сохранять работоспособность более 1000 суток.

В качестве ориентиров в таблице 1 приведены обобщенные требования к эластомерам, применяемым в УЭЦН. Эти данные взяты из Технических требований ОАО НК-ВР и рекомендаций **API 11S7** (American Petroleum Institute) (**RP 11S7**).

Требования к кессонной стойкости (неразрушаемости уплотнений при скоростном сбросе давления или ударном росте температуры) в России нормативно не сформулированы. Ниже этому фактору будет уделено отдельное внимание.

Таблица обобщенных требований к эластомерам, применяемым в УЭЦН

Группы оборудования по категориям осложняющих факторов	Исполнение оборудования	Нижняя температура хранения оборудования	Справочные характеристики скважинных условий	Требования к диафрагмам гидрозащит: допустимая температура масла, не ниже, °С
Требования НК-ВР				
1	Оборудование в стандартном исполнении, предназначенное для скважин с незначительным влиянием осложняющих факторов	- 60 °С	Температура пластовой жидкости – до 90°С; Массовая концентрация твердых частиц – до 0,5 г/л; Микротвердость частиц – до 7 баллов по шкале Мооса; Водородный показатель попутной воды – рН 5 - 8,5; Содержание попутной воды – до 99 %	- 45 ≥ + 150
2	Оборудование в коррозионно-стойком исполнении для скважин с повышенной агрессивностью пластовой жидкости	- 60 °С	Температура пластовой жидкости – до 90°С; Массовая концентрация твердых частиц – до 0,5 г/л; Микротвердость частиц – до 7 баллов по шкале Мооса; Водородный показатель попутной воды – рН 5 - 8,5; Содержание попутной воды – до 99 %; Газовый фактор пластовой жидкости – до 250 м ³ /м ³ ; Гидростатическое давление в зоне работы ПЭД – до 30 МПа; Количество агрессивных компонентов: H ₂ S – 1,25 г/л; CO ₂ – 0,15 г/л; Cl – 20 г/л; HCO ₃ – 1 г/л; Ca ³⁺ - 2 г/л	- 45 ≥ + 150
3	Оборудование в термостойком исполнении для эксплуатации в скважинах с высокой температурой пластовой жидкости	- 60 °С	Температура пластовой жидкости – до 120°С; Массовая концентрация твердых частиц – до 0,5 г/л; Микротвердость частиц – до 7 баллов по шкале Мооса; Водородный показатель попутной воды – рН 5 - 8,5; Содержание попутной воды – до 99 %; Концентрация сероводорода – до 0,01 г/л; Газовый фактор пластовой жидкости – до 350 м ³ /м ³ ; Гидростатическое давление	- 45 ≥ + 170

			в зоне работы ПЭД – до 30 МПа;	
4	Оборудование в коррозионно-термостойком исполнении для скважин с высокой температурой и коррозионной агрессивностью пластовой жидкости	- 60 °С	Температура пластовой жидкости – до 120°С; Массовая концентрация твердых частиц – до 0,5 г/л; Микротвердость частиц – до 7 баллов по шкале Мооса; Водородный показатель попутной воды – рН 5 - 8,5; Содержание попутной воды – до 99 %; Газовый фактор пластовой жидкости – до 350 м ³ /м ³ ; Гидростатическое давление в зоне работы ПЭД – до 30 МПа; Количество агрессивных компонентов: H ₂ S – 1,25 г/л; CO ₂ – 0,15 г/л; Cl – 20 г/л; HCO ₃ – 1 г/л; Ca ³⁺ - 2 г/л	- 45 ≥ + 170
5	Оборудование в коррозионно-стойком исполнении с повышенной термостойкостью для скважин с высокой температурой, газовым фактором и коррозионной агрессивностью пластовой жидкости	- 60 °С	Температура пластовой жидкости – до 150°С; Массовая концентрация твердых частиц – до 1 г/л; Микротвердость частиц – до 7 баллов по шкале Мооса; Водородный показатель попутной воды – рН 5 - 8,5; Содержание попутной воды – до 99 %; Газовый фактор пластовой жидкости – до 500 м ³ /м ³ ; Гидростатическое давление в зоне работы ПЭД – до 30 МПа; Количество агрессивных компонентов: H ₂ S – 1,25 г/л; CO ₂ – 0,15 г/л; Cl – 20 г/л; HCO ₃ – 1 г/л; Ca ³⁺ - 2 г/л	- 45 ≥ + 200
Рекомендации API 11S7 (RP 11S7)				
Группы не предусмотрены	Подбирается по эксплуатационным факторам скважины	Нет требований	Эластомер должен совмещаться со средой применения	≥ + 121 NBR
	Подбирается по эксплуатационным факторам скважины	Нет требований	Эластомер должен совмещаться со средой применения	≥ + 135 HNBR
	Подбирается по эксплуатационным факторам скважины	Нет требований	Эластомер должен совмещаться со средой применения	≥ + 163 FKM
	Подбирается по эксплуатационным факторам скважины	Нет требований	Эластомер должен совмещаться со средой применения	≥ + 177 TFEP (Aflas)

Для выполнения требований применительно к деталям гидрозащиты в настоящее время ориентируются на композиции, которые основаны на следующих базовых эластомерах.

Таблица рекомендуемых эластомеров для диафрагм гидрозащиты

Группы оборудования по категориям осложняющих факторов	Температуры применения, °С	Совместимость со средами	Эластомерный полимер	Не рекомендуемые среды
1 и 2	- 45 +150	Минеральные нефтяные масла (типа МДПН), нефтяные топлива, вода, пластовая жидкость	Нитрильные каучуки NBR бессерной вулканизации	Синтетические масла, растворы кислот и щелочи, ароматические углеводороды с содержанием H ₂ S более 6 %
3 и 4	- 45 + 170	Минеральные (типа МДПН) и синтетические масла (REDA 3, Shell Fluid), серосодержащие топлива, нефтяные топлива, вода, пластовая жидкость, амины	Гидрированные нитрильные каучуки HNBR (HSN) бессерной вулканизации	Хлороформ, кетоны, среды с содержанием H ₂ S более 15 %
5	- 45 +200	Минеральные (типа МДПН) и синтетические масла (REDA 3, Shell Fluid), серосодержащие топлива, нефтяные топлива, вода, спирты, пластовая жидкость, амины	Фтор-эластомеры типа TFEP (Aflas, Viton Extrim)	Бензол, хлорированные углеводороды с содержанием H ₂ S более 25 %

В погружном промышленном оборудовании следует избегать применять эластомеры серной вулканизации, так как сероводород (и другие продукты, способные отдавать серу) приводят к перевулканизации резин (ороговению, трещинам) и потере ими уплотняющих свойств (эластичности) и физико-механических показателей. Как правило, эластомеры серной вулканизации уступают этим же эластомерам, но перекисной вулканизации, по длительной работоспособности, теплостойкости и агрессивности.

Приведенные выше рекомендации ТНК-ВР содержат указания на обеспечение кессонной стойкости изделий. Однако нормы или критерии для нормированных испытаний в этих рекомендациях не приводятся.

Эластомеры и кессонная стойкость

Эластомеры – синтетические каучуки – производятся из углеводородных газов, содержащих СН-группу (ацетилен, метан и т.д.). С позиций термодинамики эластомеры удобно рассматривать как сверхконденсированные газы, то есть к ним применимы физические понятия: напряжение (масса), растяжение (длина), время и температура. Реально потребитель имеет дело не с чистым полимером, а композицией, содержащей различные наполнители, пластификаторы, агенты вулканизации, стабилизаторы, с помощью которых эластомер приобретает желаемые свойства.

При этом наиболее значимые физические свойства эластомеров, которые иногда выпадают из поля зрения потребителя эластомерных изделий, это:

1. практическая несжимаемость (но деформируемость);
2. изменение размеров (объема) из-за значительного теплового расширения ($\alpha = 6 - 18 \times 10^{-5}$ см/см);
3. увеличение размеров и снижение прочностных свойств из-за набухания в средах, которые растворяются в эластомерах;
4. при деформационных процессах выделять тепло внутри изделия из-за гистерезисных потерь;
5. низкая способность к теплопередаче, в результате чего эластомер из-за низкой теплопроводности является тепловым барьером;
6. способность адсорбировать (поглощать) газы;
7. ограниченная скорость диффузии газообразных и низкомолекулярных сред через эластомер.

Причем при нагреве напряженные эластомеры ведут себя по закону, описанному Джоулем: изделие из эластомера, подвергнутое напряжению растяжения и нагреву удлиняется, и, сохраняя объем, уменьшается в сечении. (Именно по этой причине в ответственных уплотнениях типа «кольцо круглого сечения» не рекомендуется применять кольца меньшего диаметра, чем посадочное место).

Из перечисленных особенностей эластомерных композиций для нефтедобывающего оборудования, работающего в мультифазной среде, нужно выделить способность поглощать газы и скорость диффузии газов.

Практически все эластомеры в условиях высокого содержания газов в пластовой жидкости и при высоком давлении окружающей среды насыщаются, в том числе растворенным газом. При снижении давления среды газ выходит из эластомера. В случае высокой скорости падения давления (скоростной декомпрессии) газ, выходя из эластомера наружу, способен разрушить полимерные связи. Процесс скоростного выхода расширяющегося газа может иметь место и при термошоке (за счет теплового расширения газа).

Некоторые виды разрушающего действия кессонного эффекта показаны на слайдах презентации.

Выходящий из эластомерной композиции газ в зависимости от напряженного состояния изделия может разрыхлять структуру материала, что демонстрируют фотографии увеличившегося в размерах лабораторного образца, формировать пузыри и, при их схлопывании, образовывать внутренние и внешние трещины.

К кессонному типу разрушений нужно отнести и нарушения целостности металло-эластомерных конструкций и массивных эластомерных изделий, возникающие из-за несовершенства технологии или нарушения технологических регламентов. Например, разрывы и/или отслоения эластомерной части статоров одновинтовых насосов. Поскольку крепление эластомера к металлу осуществляется через клеевые композиции, то в местах несплошности такого крепления образуются газовые линзы, расширяющиеся по мере накопления в них газа. Этот газ при сбросе давления среды или быстром гистерезисном разогреве эластомера, увеличиваясь в объеме, способен разрушить эластомер. Этот же эффект может проявляться при захвате воздуха в процессе подготовки сырой смеси (при вальцевании или экструзии) перед процессом формообразования и вулканизации или при использовании сырой смеси с повышенным влагосодержанием.

В любом случае нарушение работоспособности уплотнительного или другого эластомерного изделия приводит к отказу дорогостоящего оборудования.

Нормы и стандарты для оценки кессонной стойкости

Для обеспечения длительной и надежной службы различных технических систем, эксплуатируемых в жидких и газовых средах при высоком давлении, исключительно важным являются рациональный выбор эластомерных материалов и конструкции изделий из этих материалов для герметизации и иных применений.

Отсутствие специальных требований и норм (в виде отраслевых стандартов или ГОСТов, требований ТУ) приводит к тому, что производители эластомерных изделий не имеют ни ориентиров, ни стимулов к выпуску изделий, качество которых удовлетворило бы эксплуатационников.

В этой ситуации освоение методик испытаний, принятых в других странах (США, Великобритания, Норвегия), должно послужить первым шагом к созданию аналогичных отечественных методик и их принятию в качестве стандартных и обязательных. Коллективом ООО «РЕАМ-РТИ» была освоена методика испытаний в соответствии со стандартом NACE TM 0192-98 (США) и NORSOK M-710 (Норвегия).

В соответствии с требованиями стандарта NACE TM 0192-98 класс кессонной стойкости эластомерного материала определяется путем визуального изучения возникших повреждений и их классификация согласно рейтинговой системе оценок (4 класса).

Аналогично вышеприведенному стандарту, норвежский стандарт NORSOK M-710 предлагает изучение 4-х радиальных сечений образца-кольца и определение класса кессонной стойкости партии материала на основе рейтинговой системы оценок (6 классов).

Функции эластомеров в технических системах весьма многообразны. Кессонный эффект и связанные с ним разрушения эластомерных изделий проявляются в системах высокого давления, где эластомеры служат в основном в качестве уплотнительных элементов для герметизации подвижных и неподвижных соединений и диафрагм для компенсации или контроля изменения объема рабочих жидкостей и газов. Для уплотнительных элементов основным функциональным требованием является отсутствие сквозных дефектов, исключающих герметичность, а для диафрагм дополнительным требованием является сохранение эластичности.

Рейтинговая система стандарта NACE TM 0192-98 в целом адекватно описывает дефектообразование в образцах-кольцах, однако, она недостаточно избирательна и занижает класс кессонной стойкости в случаях, когда дефекты сосредоточены на поверхности уплотнителя. Испытание неадекватно моделирует условия службы уплотнения.

Данный стандарт не позволяет контролировать кессонную стойкость эластомерных изделий типа диафрагм.

Возможности повышения безотказности уплотняемых узлов нефтепромышленного оборудования

По мнению специалистов ООО «РЕАМ-РТИ» современная химия эластомерных полимеров позволяет создавать изделия, отвечающие самым жестким эксплуатационным требованиям перспективного погружного промышленного оборудования. Существуют эластомерные композиции на температуры более 300°C с высокой агрессивностойкостью, их работоспособность при низких температурах решается за счет композиционного подхода (капсулирование, разномодульность материалов, резино-металло-проволочные эластомерные композиции и т.д.)

Усилия разработчиков оборудования должны быть объединены с усилиями изготовителей уплотнительных деталей и направлены на совместимость конструктивного оформления узлов уплотнения с условиями эксплуатации.

В этой связи особая роль должна быть возложена на Технический Регламент и обновленные стандарты, и иные нормы.

В частности, в области обеспечения кессонной стойкости необходимо разработать отечественный стандарт, который должен обеспечить моделирование условий работы различных уплотнений и диафрагм, предлагать адекватную и избирательную рейтинговую систему оценки дефектов, а также дополнительно включать в себя контроль набухания эластомера в испытательном газе.

Наиболее сложные вопросы по обеспечению безотказности эластомерных деталей и моделированию явлений для целей нормированных испытаний ставит мультифазная среда, поскольку процессы миграции (диффузии)

Детали из Композиционных Полимерных материалов для производства деталей УЭЦН. Проблемы использования изделий из полимерных композиций

В отличие от эластомерных материалов, композиционные полимерные материалы (КПМ) на базе термопластов еще пока не заняли прочные позиции в нефтегазодобывающем оборудовании, применяемом в России. В первую очередь это связано с ограниченной теплостойкостью ранее доступных полимеров, прежде всего на основе полиамидов.

Поэтому, несмотря на явные преимущества:

- низкая плотность и вследствие этого низкая масса изделий
- низкая виброактивность изделий
- стойкость к образованию солей отложения
- стойкость в агрессивных средах
- стойкость к коррозии
- стойкость к гидроабразивному износу
- низкий коэффициент трения
- износостойкость в узлах трения скольжения (подшипники)
- способность работать при наличии «сухого» трения
- возможность обеспечения работоспособности при температурах нагрева 300⁰С

применение КПМ существенно сдерживается.

Сравнительные свойства инженерного полимера Ryton и чугуна «нирезист» по данным ОАО «Борец».

Материал	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Твердость, НВ	Относительное удлинение, %
Полифениленсульфон (PPS) Ryton R 4-200	195	265	275	96	1,6
Чугун «нирезист»	176	353	180	120-180	1,5

Положение с применением изделий из КПМ усугубляется еще и тем, что доля скважин глубиной более 2000 метров и осложненных газовым фактором постоянно увеличивается, а это значит, что увеличивается и тепловая нагрузка на детали, особенно на рабочие органы ступеней УЭЦН.

Однако недавно разработанные новейшие КПМ позволяют говорить о том, что в области теплостойкости полимеров произведен настоящий прорыв. В настоящее время стали доступны полимеры с теплостойкостью до 320⁰С, что почти на 100⁰С превышает теплостойкость ранее применяемых в УЭЦН полимеров. Применение изделий из этих КПМ позволит существенно увеличить надежность рабочих органов

УЭЦН в условиях высоких температур, тем более что механическая прочность по ряду параметров не уступает металлам.

Теория и практика говорят нам о том, что перегревы до температур свыше 200°C возникают прежде всего в зоне ступицы рабочего колеса, при этом максимальные температуры развиваются в ступенях, расположенных за входным модулем (после газосепаратора). Перегревы в районе ступиц обусловлены повышенной кавитацией и локальным тепловыделением за счет трения. А так как полимеры обладают низкой теплопроводящей способностью, перегрев еще более усиливается. И это является дополнительной проблемой.

Для решения данной проблемы ООО «РЕАМ-РТИ» использует специально разработанную марку КПМ с увеличенной теплопроводностью за счет присутствия в композиции специального графита и углеволокна. Теплопроводность в данной марке увеличена более чем в три раза с 25 Вт/м*°C у чистого полимера и до 92 Вт/м*°C у наполненного углеволокном и графитом.

Второй вариант решения проблемы – это использование специальных металлических вставок, которые с одной стороны отводят образовавшееся тепло в вал, с другой стороны армируют полимер. Проблем с разностью коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) у полимеров и металлов в данном случае нет, так как КПМ и металл имеют приблизительно одинаковый КЛТР, то есть около $15 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$. В настоящее время технология с применением таких вставок отработывается.

Еще одной проблемой при производстве изделий из КПМ является то, что при инъекционном литье невозможно получить такую же точность размеров, как при механической обработке. Поэтому специалистами ООО «РЕАМ-РТИ» разработан метод горячей калибровки особо точных размеров, что позволяет получать размеры с высокой точностью.

Для изготовления рабочих колес из полимеров в России традиционно используется метод литья под давлением с последующей сваркой ультразвуком ведущего и ведомого дисков. Несмотря на то, что при нормальных условиях прочность сварного шва достаточно велика, в эксплуатации отмечаются случаи отрыва ведомого диска. Это обуславливается невозможностью неразрушающего контроля прочности сварного шва при массовом производстве, а так же тем, что даже при самой лучшей сварке прочность материала в сварном шве всегда составляет не более 50% от прочности самого полимера. Для решения данной проблемы специалистами ООО «РЕАМ-РТИ» разработана технология изготовления монолитных рабочих колес. При этом данная технология позволяет получать проточные каналы с более сложной геометрией, чем практикуемые технологии.

Низкая теплопроводность полимеров является препятствием и при разработке направляющих аппаратов из КПМ. Поэтому на настоящем этапе специалистами ООО «РЕАМ-РТИ» принято решение изготавливать металлические направляющие аппараты с полимерными покрытиями из КПМ, например, для защиты от коррозии и солеотложения использовать специальные марки полифениленсульфона (PPS).

Анализ описанных выше проблем и трудностей применения КПМ в рабочих органах УЭЦН привел к следующим решениям, которые имеют доступное технологическое обеспечение и обеспечат необходимую длительную работоспособность в осложненных условиях эксплуатации:

1. Рабочее колесо для повышения надежности изготавливать монолитным из теплостойких КГМ, что позволит обеспечить защиту рабочих органов УЭЦН от коррозии и солеотложения.
2. Направляющий аппарат изготавливать композитным, на металлическую основу наносить полимерное покрытие. Это позволит снизить температурную напряженность рабочего колеса за счет отвода тепла в направляющий аппарат и повысить эффективную работоспособность ступени УЭЦН в целом.
3. Теплостойкость рабочего колеса обеспечить за счет использования композиционного полимерного материала типа Ryton с теплостойкостью до 270°C.
4. Для защиты от локальных перегревов в районе ступицы использовать специальный композиционный материал на базе РЕЕК с теплостойкостью до 320°C и улучшенной теплопроводностью.

Использование дорогостоящего сырья и сложных технологий естественно отразится и на стоимости деталей. Вместе с тем не всегда требуется такие высокие свойства.

Поэтому мы предлагаем несколько серий рабочих органов. А именно:

1. Серия «Стандарт» для глубин до 1700 м

- Рабочее колесо сварной конструкции из материала Ryton и ступицей из модифицированного ПТФЭ материала Ryton. (\$ 3.00)
- Направляющий аппарат, покрытый материалом Ryton. (\$ 7.00)

2. Серия «Монолит Стандарт» для глубин до 2000 м

- Рабочее колесо монолитной конструкции из материала Ryton и ступицей из модифицированного ПТФЭ материала Ryton. (\$ 4.50)
- Направляющий аппарат, покрытый материалом Ryton. (\$ 7.00)

3. Серия «Монолит Супер» для глубин свыше 2000 м (4-я категория сложности по классификации ТНК-ВР)

- Рабочее колесо монолитной конструкции из материала Ryton и ступицей из модифицированного ПТФЭ материала Ryton. (\$ 5.50)
- Направляющий аппарат, покрытый материалом Ryton. (\$ 7.00)

4. Серия «РЕЕК Супер +» для глубин свыше 2000 м (5-я категория сложности по классификации ТНК-ВР)

- Рабочее колесо монолитной конструкции из материала РЕЕК. (\$ 15.00)
- Направляющий аппарат, покрытый материалом Ryton. (\$ 7.00)

Американская фирма Green Tweed, которая специализируется на выпуске комплектующих к УЭЦН из полимерных композитов, использует в своем производстве аналогичные полимерные матрицы. Данная фирма явилась для нас в своем роде ориентиром для разработки наших конструкций и КГМ.

В настоящее время специалисты ООО «РЕАМ-РТИ» постоянно ощущают неэффективность действующих в России норм и стандартов в нефтегазодобывающей отрасли. Техническое регулирование отстает от задач интенсификации добычи нефти и газа. Что препятствует массовому производству конкурентоспособной продукции, неотъемлемой частью которой являются изделия из эластомеров и полимерных композитов?

Целесообразно создание федеральных испытательных центров (полигонов) по опыту США и Канады, которые позволили бы собрать объективные данные по эффективности технологий и оборудования в различных осложняющих условиях добычи и транспортировки углеводородного сырья.

Желающим подробнее познакомиться с результатами производственных возможностей предприятия ООО «РЕАМ-РТИ» и перспективными разработками рекомендуем посетить сайт компании: www.reamt.ru.