

УДК 539.3.621.001.2

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ВЯЗКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Г.Х. Мурзаханов<sup>1</sup>,  
А.А. Барсуков<sup>1</sup>,  
В.Я. Великоднев<sup>2</sup>,  
И.П. Шабалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГЦ ОАО «Мосгаз»,

<sup>2</sup>ООО «Трубные инновационные  
технологии»

COMPUTATIONAL-EXPERIMENTAL  
STUDY OF DEFORMATION AND  
STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE  
HIGH TENSILE STEEL FOR GAS MAINS

G.K. MURZAKHANOV, A.A. BARSUKOV,  
V.Y. VELIKODNEV, I.P. SHABALOV

В данной работе на примере сталей различных классов прочности описаны результаты комплекса исследований методов испытания высокопрочных и высоковязких трубных сталей нового поколения на стойкость к протяженному разрушению [1, 3]. Численным методом исследовано влияние параметров вязкого динамического разрушения и масштабного фактора на результаты испытаний на ударный изгиб [2, 4], определены «паразитные» затраты энергии на пластические деформации участков образца при испытании на ударный изгиб и развитие поперечной трещины [5, 6].

**Ключевые слова:** ударная вязкость, численный метод, критерий разрушения, пластическое деформирование, работа удара, энергия разрушения, «чистая» ударная вязкость.

In this paper using example steels of different strength classes describes the results of complex research of new generation highly strength and highly viscous steel testing methods to lengthy destruction resistance. Numerically investigated the influence of the viscous dynamic destruction parameters and the scale factor to the results of impact test, defined «parasitic» energy consumed in plastic deformation of the sample sections in the impact test and the development of a transverse crack.

**KEYWORDS:** the impact test, numerical method, fracture criterion, specific areas of plastic deformation, impact energy, fracture energy, «clean» toughness.

## АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

Модель включает (рис. 1):

1. Образец с геометрическими размерами: высота, ширина, общая длина, пролет между опорами.

Образец позволяет моделировать:

1.1. Испытание падающим грузом (модель материала позволяет учесть пластические деформации, приобретенные в процессе нанесения концентратора методом вдавливания);

1.2. Испытание на ударный изгиб образцов с любым видом концентратора:

– типа Шарпи (V-образный концентратор);

– типа Менаже (U-образный концентратор), имеющих разнообразие геометрические характеристики, как соответствующие ГОСТ (5×10×55, 7.5×10×55, 10×10×55), так и пользовательские.

2. Боек рассматривается как абсолютно твердое недеформируемое тело с установленными геометрическими размерами контактной поверхности, массой, начальной скоростью движения (рис. 2).

3. Опоры рассматриваются как недеформируемое тело, находящееся в состоянии покоя.

Сетка конечных элементов создана с учетом (рис. 3):

– пластичности и геометрической нелинейности перераспределения деформаций (в областях концен-

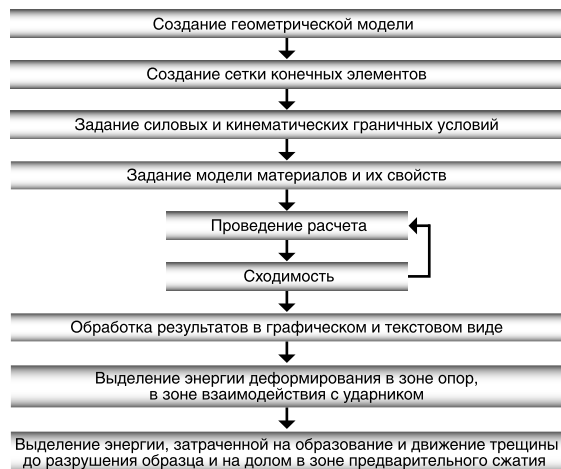


Рис. 1.

Алгоритм расчетов

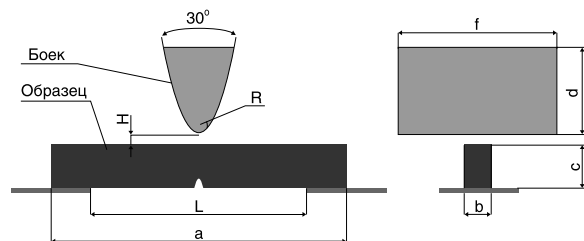


Рис. 2.

Построение физической модели

тратора, распространения трещины, взаимодействия образца с бойком и опорами сетка более густая, что позволяет получить более корректные результаты искоемых характеристик);

– времени, потраченного на машинное вычисление (более крупная сетка в оставшейся части образца обусловлена тем, что количество элементов в модели пропорционально времени, затраченному на проведение расчета, и малой информативностью механических характеристик, получаемых для данной области).

Моделью материала образца была выбрана модель пластичности Джонсона-Кука с наступлением разрушения по достижению заданной величины относительного сужения, зависящая от деформации и учитывающая уравнение состояния, отражающее истинную диаграмму растяжения.

Для задания реальных механических свойств материала в расчетную модель была проведена серия испытаний на растяжение и сжатие основного металла. Результаты механических испытаний отобранных образцов из разных зон подтвердили наличие неоднородности механических характеристик листа по толщине (рис. 4, 5). Впоследствии полученные характеристики были заданы в расчетную модель.

Г.Х. МУРЗАХАНОВ, А.А. БАРСУКОВ,  
В.Я. ВЕЛИКОДНЕВ, И.П. ШАБАЛОВ  
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ВЯЗКИХ  
СТАЛЕЙ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

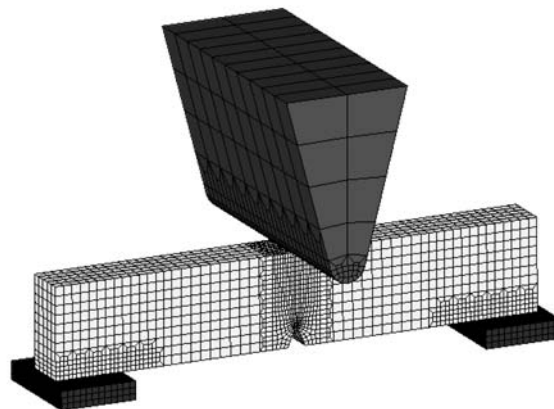


Рис. 3.

Конечно-элементная модель

ВНЕШНЯЯ СТОРОНА ТРУБЫ	1
	2
	3
	4
ВНУТРЕННЯЯ СТОРОНА ТРУБЫ	5

Рис. 4.

Схема отбора образцов по толщине металла трубы

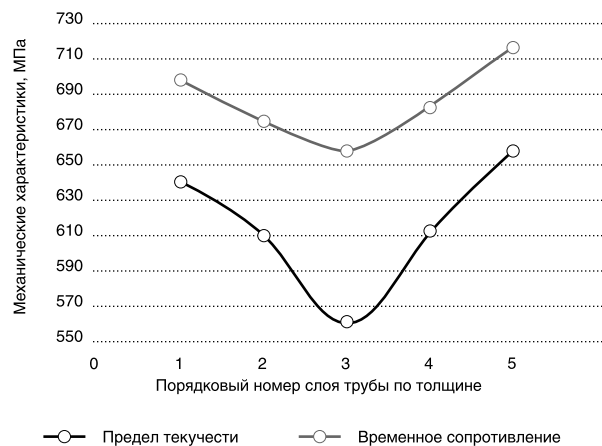


Рис. 5.

Зависимость механических характеристик материала трубы класса прочности К65 по толщине

Выражение Джонсона-Кука для напряжения текучести в данной модели от истинной пластической деформации и без учета температуры имеет вид:

$$\bar{\sigma}_p = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + c \ln \epsilon^*),$$

$\bar{\epsilon}_p$  – эффективная пластическая деформация,  
 $\epsilon^* = \frac{\bar{\epsilon}_p}{\epsilon_0}$  – скорость эффективной пластической деформации.

где A, B, C и n – входные константы.

Критерием разрушения (удаления элемента из расчетной схемы) для данной модели материала является достижение величины истинного относительного сужения при разрыве.

Для вычисления значений входных констант и критерия разрушения необходимо воспользоваться аппроксимацией инженерной диаграммы деформирования материала (полученной на основе испытаний) в истинную диаграмму.

Деформация при разрушении задается соотношением:

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \epsilon^*].$$

Разрушение происходит, когда параметр повреждения:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^p}{\epsilon^f}.$$

Верификация расчетной модели проведена по величине внутренней полной энергии разрушения образца из стальной трубы класса прочности К65 при температуре испытания  $t = +200^\circ \text{C}$ .

Согласно полученным величинам погрешности конечно-элементного расчета по сравнению с результатами испытаний (табл. 1) делается вывод о применимости полученной модели к дальнейшим исследованиям особенностей высокоскоростного деформирования представленных материалов.

В Московском городском центре ОАО «Мосгаз» изготовлена опытная установка для проведения испытаний при ударном осевом растяжении, предназначенная для определения значений ударной вязкости высокопрочных и высоковязких сталей. Проведена

ТАБЛИЦА 1.

Погрешность расчетной модели

Тип образца	$E_{исп}$ , Дж	$E_{расч}$ , Дж	Погрешность, %
Шарпи 5×10×55	100,53	101,53	0,98
Шарпи 10×10×55	318,35	315,01	1,05
ИПГ 27,7×75×300	12180	12570	3,10

серия натуральных испытаний при ударном осевом растяжении цилиндрических образцов типа 1 (с V – образным концентратором) и типа 2 (10 – кратный) на копре маятниковом фирмы Instron, модель SI-1M с максимальной энергией удара 450 Дж с использованием опытной установки.

#### ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ВО ВРЕМЯ ИСПЫТАНИЙ

1. Климатическая камера Neslab ULT 80.
2. Термопара с контроллером для определения температуры образца.
3. Маятниковый копер Instron SI-1M с дополнительной оснасткой для проведения испытаний на ударное растяжение.

#### ПРИНЦИП РАБОТЫ

1. Метод проведения испытаний при ударном осевом растяжении основан на разрушении образца одним ударом молота маятникового копра.
2. Образец устанавливается в специальный держатель молота маятникового копра с одной стороны, с другой стороны на образце закреплен «сухарь», определенной массы и геометрических размеров.
3. Маятник копра устанавливают в верхнее положение. Контрольную стрелку прибора копра выставляют на ноль.
4. Производят удар. При ударе сухарь ударяется об опоры копра. В результате происходит разрушение образца.

#### ТЕМПЕРАТУРА ИСПЫТАНИЙ

В соответствии с п. 3.4 (ГОСТ 9454-78):

Для обеспечения требуемой температуры испытания образцы перед установкой на копер должны быть переохлаждены (при температуре испытания ниже комнатной) или перегреты (при температуре испыта-

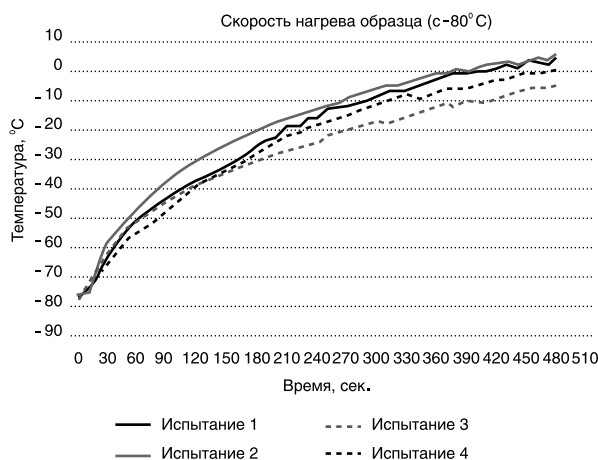


РИС. 6.

Нагрев образца с  $-80^\circ \text{C}$  в теч. 8 мин

ТАБЛИЦА 2.

Нагрев образца с  $-80^{\circ}\text{C}$  в течение 1 мин., определение момента сброса маятника

Время, сек	Температура, $^{\circ}\text{C}$			
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 4
0	-76,67	-75,96	-77,38	-75,96
10	-74,53	-73,81	-72,37	-73,09
20	-68,71	-66,48	-64,98	-68,71
30	-62,72	-58,88	-60,42	-64,23
40	-57,33	-54,19	-56,55	-60,42
50	-53,4	-49,4	-52,6	-57,33
60	-50,2	-45,32	-50,2	-54,98

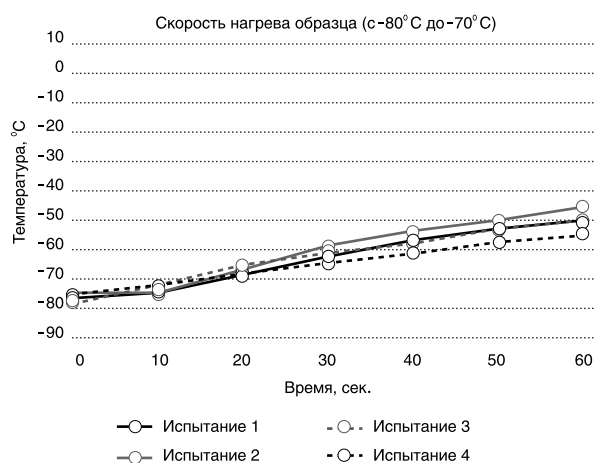


РИС. 7.

Скорость нагрева образца

ния выше комнатной). Степень переохлаждения или перегрева должна обеспечивать требуемую температуру испытания и должна определяться экспериментальным путем.

Скорость нагрева охлажденного образца на воздухе после извлечения образца из климатической камеры (для каждой из температур испытания) определялась с помощью термпары, установленной на контрольный образец, по результатам трех измерений (табл. 2):

Как видно из графика изменения температуры образца после извлечения его из климатической камеры, происходит быстрое повышение температуры образца. Скорость нагрева образца пропорциональна степени его охлаждения. С течением времени процесс нагрева образца замедляется (рис. 6, 7).

Сравнительно медленный нагрев образца в первые секунды после извлечения из климатической камеры связан с образованием пленки из хладогена, препятствующей нагреву.

Г. Х. МУРЗАХАНОВ, А. А. БАРСУКОВ, В. Я. ВЕЛИКОДНЕВ, И. П. ШАБАЛОВ  
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ВЯЗКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

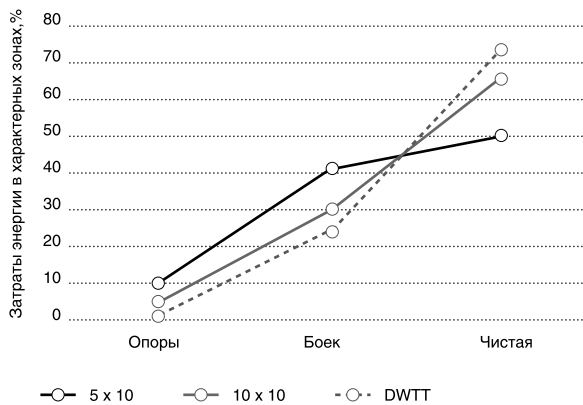


РИС. 8.

Характерные зоны пластического деформирования



РИС. 9.

Работа удара (CVN) при испытании образцов полного размера для различных классов прочности стали

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные характерные зоны пластического деформирования при разрушении металла образца из высокопрочных и высоковязких сталей методом ударного изгиба представлены на рис. 8.

По результатам численных исследований выделяются следующие зоны пластического деформирования и разрушения металла образца:

- зоны растяжения образца;
- зоны сжатия образца;
- зоны локальной деформации металла на опорах;
- зона локальной деформации металла в месте воздействия ударника;
- траектория движения трещины.

При испытаниях на ударный изгиб высокопрочных и высоковязких сталей классов прочности К60, К65 и выше значительная часть энергии бояка тратится на локальную пластическую деформацию металла над опорами и в месте воздействия ударника.

ТАБЛИЦА 3.

Сравнение характеристик ударной вязкости

Т, °С	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>					
	Ударное растяжение		Ударный изгиб, ПР		Ударный изгиб, ЧР	
	10 кратный	С надрезом	10×10	5×10	10×10	5×10
20	732,74	271,89	393,76	251,33	259,98	124,58
-20	621,86	260,08	363,09	211,98	238,37	129,82
-40	596,74	244,79	208,90	211,70	227,62	119,35
-70	111,56	46,26	130,26	198,40	178,32	98,26

ПР – ударная вязкость, вычисленная по полной энергии разрушения образца;

ЧР – «реальная» ударная вязкость, вычисленная по чистой энергии разрушения образца.

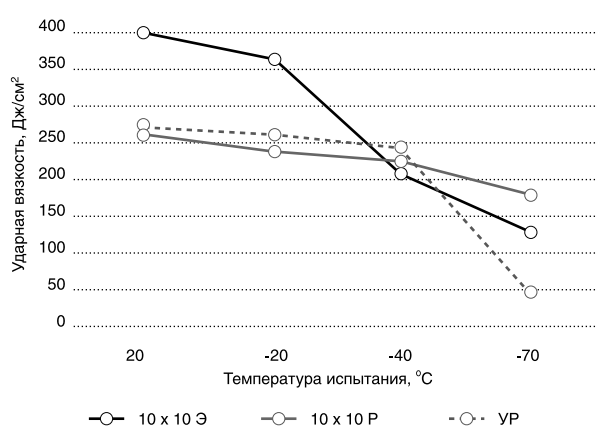


Рис. 10.

Сравнение значений ударной вязкости: – 10×10 (Э) – ударная вязкость, полученная при испытании на ударный изгиб образца Шарпи 10×10×55 мм. 10×10 (Р) – «реальная» ударная вязкость, полученная при моделировании испытания на ударный изгиб образца Шарпи 10×10×55 мм. УР – ударная вязкость, полученная при испытании при ударном осевом растяжении образцов типа 1 (с V – образным концентратором)

Из графика (рис. 9) следует, что у сталей более высокого класса прочности при испытаниях на ударный изгиб удельная доля «паразитной» энергии выше, в связи с их повышенной вязкостью относительно сталей классом прочности ниже.

Испытания при ударном осевом растяжении высокопрочных и высоковязких сталей показывают хорошую сходимость со значением «чистой» ударной вязкости по сравнению с испытаниями на ударный изгиб (табл. 3, рис. 10).

**ВЫВОДЫ**

На основе произведенных исследований сделан ряд практических выводов и рекомендаций по определению ударной вязкости высокопрочных и высоковязких трубных сталей и применимости данных зна-

чений ударной вязкости к определению стойкости к протяженному разрушению:

- разработанная методика позволила получить «чистую» энергию разрушения образца на ударный изгиб, выделив «паразитную» энергию, затраченную на возникновение зон локального деформирования в опорах и месте воздействия ударника;

- данная модель позволяет путем задания множества параметров механических характеристик исследовать поведение высокопрочных и высоковязких сталей, включая перспективные, при различных температурах на стойкость к протяженному разрушению;

- испытания при ударном растяжении высокопрочных и высоковязких сталей показывают хорошую сходимость со значением «чистой» ударной вязкости по сравнению с испытаниями на ударный изгиб.

Следующим этапом работы планируется на основании полученных моделей деформации и разрушения металла:

- разработка модели протяженного разрушения газопровода для определения уровня «чистой» энергии разрушения металла трубы необходимой для локализации протяженного разрушения;

- расчетным методом обосновать требования к металлу перспективных труб, обеспечивающие стойкость к протяженному разрушению, или произвести проверку полученных сталей на стойкость к протяженному разрушению.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Шабалов И.П., Великоднев В.Я. Численные исследование особенностей деформирования высоковязкой трубной стали при испытаниях на ударный изгиб // V Международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее», тезисы докладов. М.: ОАО Газпром ВНИИГАЗ. 2013. С. 104.
2. Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Семенов А.С., Макшин А.В. Имитационное

- моделирование разрушения образцов из трубных сталей при ударном нагружении // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. М.: Изд. МАИ, 2013. Т. 1. С. 167.
3. **ШАБАЛОВ И.П., Великоднев В.Я., Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Макшин А.В.** Обоснование требований к трубам магистральных газопроводов в зонах высокой сейсмичности и активных тектонических разломов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2013. № 2. С. 21–26.
  4. **ШАБАЛОВ И.П., Великоднев В.Я., Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Федоров Л.С.** Оценка локальных затрат энергии при испытаниях высоковязких трубных сталей на ударный изгиб численными методами // ГТС ВНИИГАЗ, 2013.
  5. **ШАБАЛОВ И.П., Великоднев В.Я., Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Федоров Л.С.** Имитационное моделирование динамических испытаний высоковязких трубных сталей // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2014. № 2. С. 46–50.
  6. **ШАБАЛОВ И.П., Великоднев В.Я., Мурзаханов Г.Х., Барсуков А.А., Федоров Л.С.** Ударная вязкость высоковязких трубных сталей при ударном растяжении как параметр стойкости трубных сталей к протяженному разрушению // Сборник трудов VII Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур». ПРОСТ 2014. 22–24 апреля 2014 г., Москва, НИТУ «МИСиС». М.: Почерк мастера. 2014. 222 с.

**Г.Х. МУРЗАХАНОВ, А.А. БАРСУКОВ, В.Я. ВЕЛИКОДНЕВ, И.П. ШАБАЛОВ**  
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ВЯЗКИХ  
СТАЛЕЙ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

**Мурзаханов Гумер Хасанович,**  
д.т.н., профессор, советник Генерального директора, директор МГЦ ОАО «Мосгаз»

☎ 105120, г. Москва, Мрузовский пер. 11,  
тел.: +7 (495) 916-59-30, +7 (919) 106-08-39,  
e-mail: MurzakhanovGK@mos-gaz.ru

**Барсуков Алексей Анатольевич,**  
заместитель директора МГЦ ОАО «МОСГАЗ»,

☎ 115477, г. Москва, ул. Промышленная 10А, стр. 1,  
тел.: +7 (499) 218-12-97, e-mail: BarsukovAA@mos-gaz.ru

**Великоднев Валерий Яковлевич,**  
д.т.н., технический директор ООО «Трубные инновационные технологии»

☎ 127051, г. Москва, ул. Цветной бульвар, д. 2,  
тел.: +7 (499) 346-01-97

**Шабалов И.П.**  
д.т.н. генеральный директор ООО «Трубные инновационные технологии»  
☎