

**Риск-ориентированная оценка
глубины дефектов трубопровода
с использованием результатов внутритрубной диагностики
и экспертных мнений**

Тимашев С.А.^{1,2}, Почекета А.А.¹

¹ НИЦ «Надёжность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, Екатеринбург

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Предлагается нечётко-вероятностный метод прогнозирования **роста дефектов** и риска протечек/щелевых разрывов трубопровода в условиях неопределённости (неизбежно неточный внутритрубный контроль, плохо предсказуемые климатические условия) с учётом мнений экспертов.

Расчёт выполняется с использованием методов оценки целостности трубопроводных систем [1] на основе:

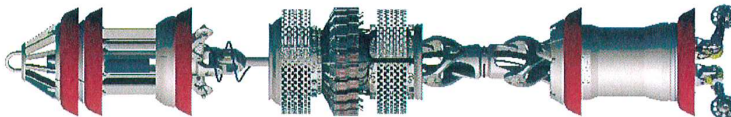
- 1) данных внутритрубной диагностики [2] о потере металла в стенке трубы: основной показатель — остаточная толщина стенки;
- 2) экспертных мнений об износе участка трубы в месте дефекта.

[1] Тимашев С.А., Бушинская А.В., Малюкова М.Г., Полуян Л.В. Целостность и безопасность трубопроводных систем. — Екб: УрО РАН, 2013. — 589 с.

[2] Гетманский М.Д., Житников Ю.В. и др. Организация системы контроля технического состояния промышленных трубопроводов... // Территория нефтегаз. — 2007. — №4. — С. 50–55.



РЕГИСТРАЦИЯ ПОТЕРЬ МЕТАЛЛА, ДЕФЕКТОВ ПОПЕРЕЧНЫХ СВАРНЫХ СТЫКОВ, ПОПЕРЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ (ТРЕЩИН, РИСОК), ЗАДИРОВ, ДЕФЕКТОВ ГЕОМЕТРИИ, КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДА



Основные технические характеристики

Исполнение (наружный диаметр трубопровода, Дн)	12" (325 мм)
Длина ¹	1982 мм
Масса ¹	200 кг
Ресурс батарей (максимальное время работы) ¹	250 часов
Направление намагничивания	продольное
Шаг измерений вдоль оси трубопровода	3 мм
Шаг измерений поперек оси трубопровода	3 мм
Толщина стенки ²	до 15 мм
Среда (продукт) перекачки	нефть, нефтепродукты, природные и промышленные газы, атмосферный воздух, вода
Рабочее давление ³	жидкость: от 0,5 МПа до 12,0 МПа газ: от 2,0 МПа до 12,0 МПа

¹ Указана стандартная конфигурация дефектоскопа (может изменяться)

² Указана максимальная, при отклонениях от нормативных условий точность снижается

³ Возможна работа при других давлениях, при этом снижается точность

Обнаружение наиболее уязвимых участков трубопровода

#	Дистанция, м	Отн. дистанция, м	Описание	Толщина стенки трубы, мм	Ост. толщина стенки трубы, мм	Глубина, % от WT	Глубина, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Тип	Примеча эксперта
1	159.8	7.8	потеря металла	10	7.6	24.5	2.5	135	31	внутр.	
2	175.1	5.1	потеря металла	10	7.9	21.5	2.2	68	37	внутр.	
3	211.6	1	потеря металла	10	8	20.4	2	40	23	внутр.	
4	231.7	2.1	расслоение (наклонн.) под муфтой	10	8	20	2	288	94	внутрист.	не ремонт
5	258.4	5.8	потеря металла	10	7.9	20.6	2.1	59	32	внешн.	
6	555.7	1.6	потеря металла	10	7.7	22.8	2.3	47	35	внутр.	
7	644.3	2.7	потеря металла	10	6.2	37.6 	3.8	32	21	внутр.	
8	719.2	4.8	потеря металла	12	9.4	21.8	2.6	15	15	внутр.	производ дефект

1 Постановка задачи

Трубопровод, работающий в нестабильных природных условиях, требует оценки износа всех его секций, т.е. определения моментов времени T_w , T_a или T_c , в которые дефект становится *предупреждающим*, *опасным* или *критическим* (*Warning*, *Alarm*, *Critical*).

На практике сложно определить эти моменты времени, но можно спрогнозировать отрезки времени $[T_w - \Delta T; T_w + \Delta T]$, $[T_a - \Delta T; T_a + \Delta T]$ и $[T_c - \Delta T; T_c + \Delta T]$, в которые ожидается соотв. уровень износа.

Инструменты ВТД определяют (ультразвуковым, магнитным методом) глубину дефекта (остаточную толщину трубы в месте дефекта): пусть d_w , d_a и d_c — пороговые значения *глубины дефекта* в соответствии с указанными уровнями безопасности, и, аналогично, *интервальные оценки*: $[d_w - \Delta d; d_w + \Delta d]$, $[d_a - \Delta d; d_a + \Delta d]$ и $[d_c - \Delta d; d_c + \Delta d]$.

2 Толщина стенки трубы в месте дефекта

Пусть момент времени $t_0=0$ — начало эксплуатации трубопровода, и в этот момент уже обнаружен дефект *глубины* d_0 .

Предположим, что рост дефекта подчиняется экспоненциальному закону [1, Раздел 4]. *Глубина дефекта* через время t будет

$$d(t) = d_0 e^{K(t-t_0)} = d_0 e^{Kt}, \quad (1)$$

где *параметр роста* дефекта K лишь **условно** можно назвать скоростью роста (т.к. дефект растёт **нелинейно**).

Настоящее значение K для конкретного дефекта заранее неизвестно. Оно зависит от локальных свойств среды, окружающей данную секцию трубопровода.

Более того, значение этого параметра может быть непостоянно. Его можно приблизительно рассчитать по собранным ранее данным.

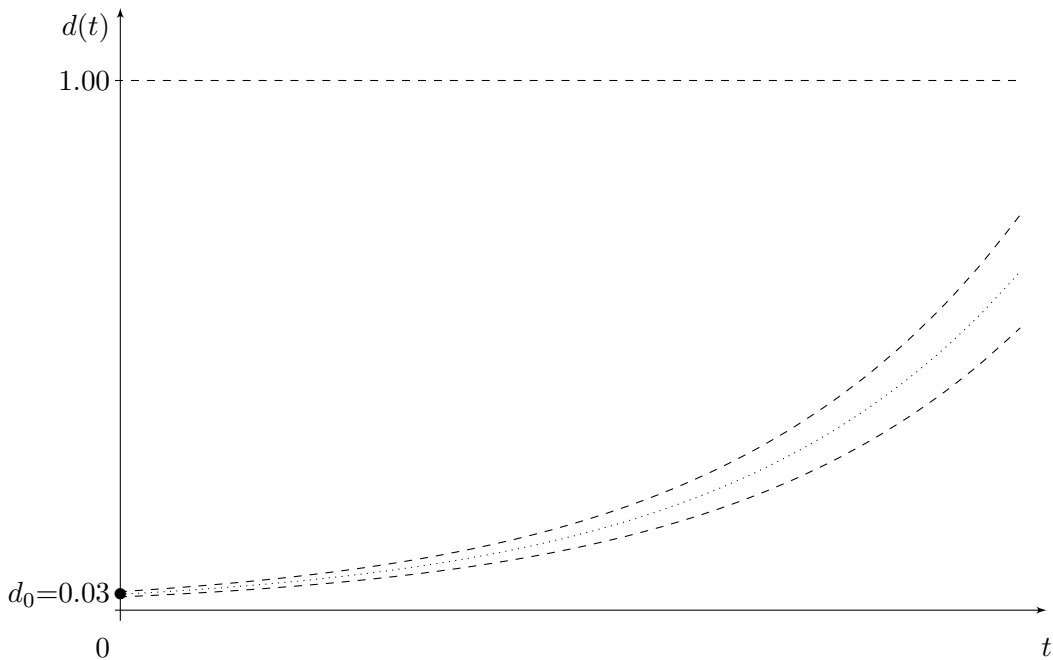


Рис. 1: *Глубина дефекта* $d(t)=d_0e^{Kt}$ в терминах начальной толщины стенки трубы. Центральная линия из точек показывает глубину дефекта при $d_0=0.030$, пунктирные линии соответствуют $d_0=0.030 \pm 0.005$

Повторная процедура ВТД

Пусть d_* – новая (измеренная инструментом ВТД в момент времени t_*) *глубина* наблюдаемого дефекта.

Подставляя значения $t = t_*$ и $d(t) = d_*$ в (1) и решая его относительно K , пересчитываем *параметр роста* дефекта,

$$K = \frac{1}{d_*} \log \frac{d_*}{d_0}. \quad (2)$$

На практике *параметр роста* K считаем нечёткой величиной,

$$K \pm \Delta K,$$

из-за неизбежной погрешности ΔK , возникающей при его определении.

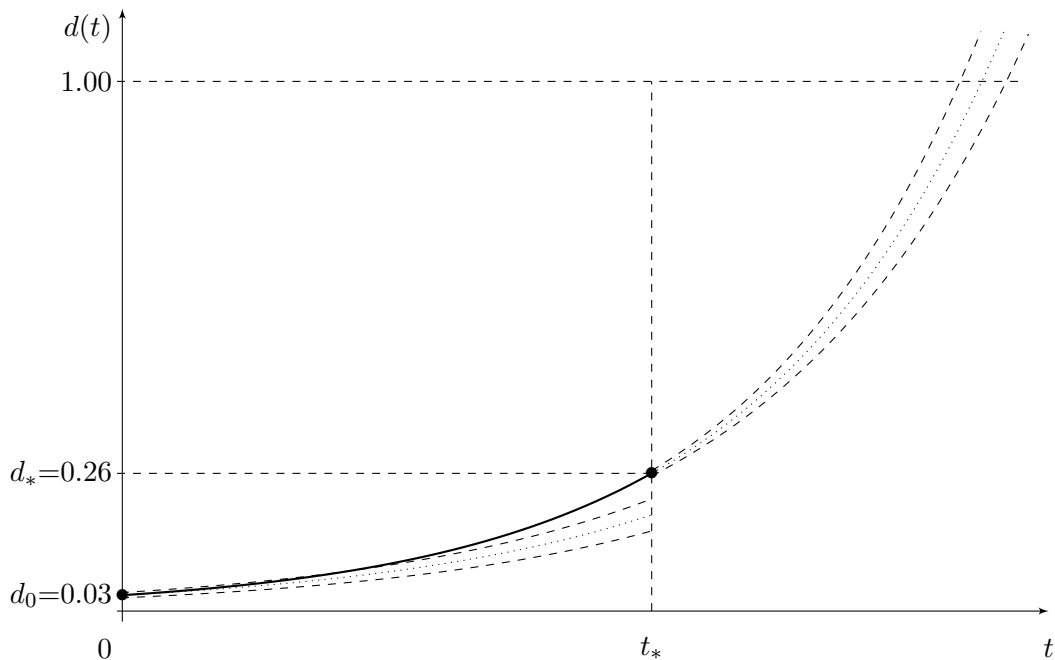


Рис. 2: Новый прогноз значения *глубины дефекта*. В момент времени t_* новая *глубина дефекта* $d_* = 0.26$ измерена с погрешностью $\Delta d_0 = 0.005$. Пересчитанный *параметр роста* $K = 0.535$, погрешность его определения $\Delta K = 0.03$. Сплошная линия показывает реальный рост *глубины дефекта* до момента t_* ; линия из точек – прогноз *глубины дефекта*; две пунктирные линии – наилучший и наихудший варианты прогноза

Тот факт, что *глубина дефекта* d_* вышла за пределы изначально прогнозируемой интервальной оценки, не должен вызывать удивления, поскольку предыдущая оценка была построена с учётом лишь погрешности Δd_0 измерения d_0 , а интервальной оценки *параметра роста* K не было.

Но именно параметр K в наибольшей степени влияет на рост дефекта.

Чем чаще мы повторяем процедуру ВТД (например, каждые 2 года), тем точнее по новым значениям d_* можно определить *параметр роста* K для конкретного дефекта.

3 Учёт мнения эксперта

В простейшем случае эксперта спрашивают: в какой момент времени T_c глубина данного дефекта достигнет критического (*Critical*) уровня?

Эксперт сообщает:

- а) Вероятность того, что дефект достигнет **критического уровня** в момент времени $[T_c - \Delta T; T_c + \Delta T]$, равна 1.

либо:

- б) **Глубина дефекта** будет приближённо достигнет **критического уровня highly-likely** в момент времени $[T_c - \Delta T; T_c + \Delta T]$.

а) *Интервальная оценка* (Interval estimation) б) *Нечёткая оценка* (Fuzzy estimation)

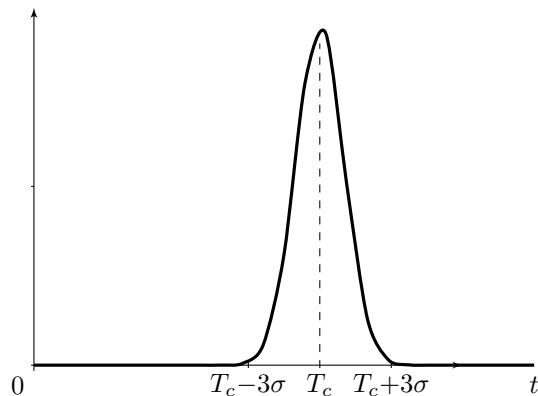
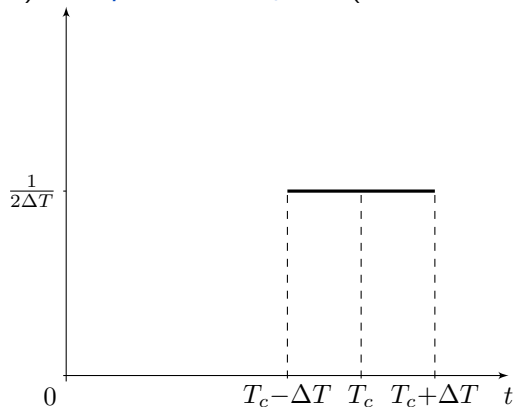


Рис. 3: Интерпретация экспертного мнения о периоде времени, в который рассматриваемый дефект достигает **критического уровня**, в терминах функции плотности вероятности (ФПВ): а) непрерывное равномерное распределение $\mathcal{U}[T_c - \Delta T; T_c + \Delta T]$; б) нормальное распределение $\mathcal{N}(T_c, \sigma^2)$, где σ можно выбрать, например, используя «правило 3σ », т.е. $3\sigma = \Delta T$.

Вероятность, описываемую функцией плотности вероятности (ФПВ), мы понимаем как уверенность эксперта в своей оценке.

Примеры приведены для **критического уровня** износа секции трубы (**Critical**) – разумеется, экспертные оценки достижения дефектом уровней *Warning* и *Alarm* можно обрабатывать аналогично.

3.1 *Интервальное представление* экспертного мнения

- а) **Критическое значение** $d_c \pm \Delta d$ *глубины дефекта* будет достигнуто в момент времени $T_c \pm \Delta T$.

Изображается прямоугольником на Рис. 4.

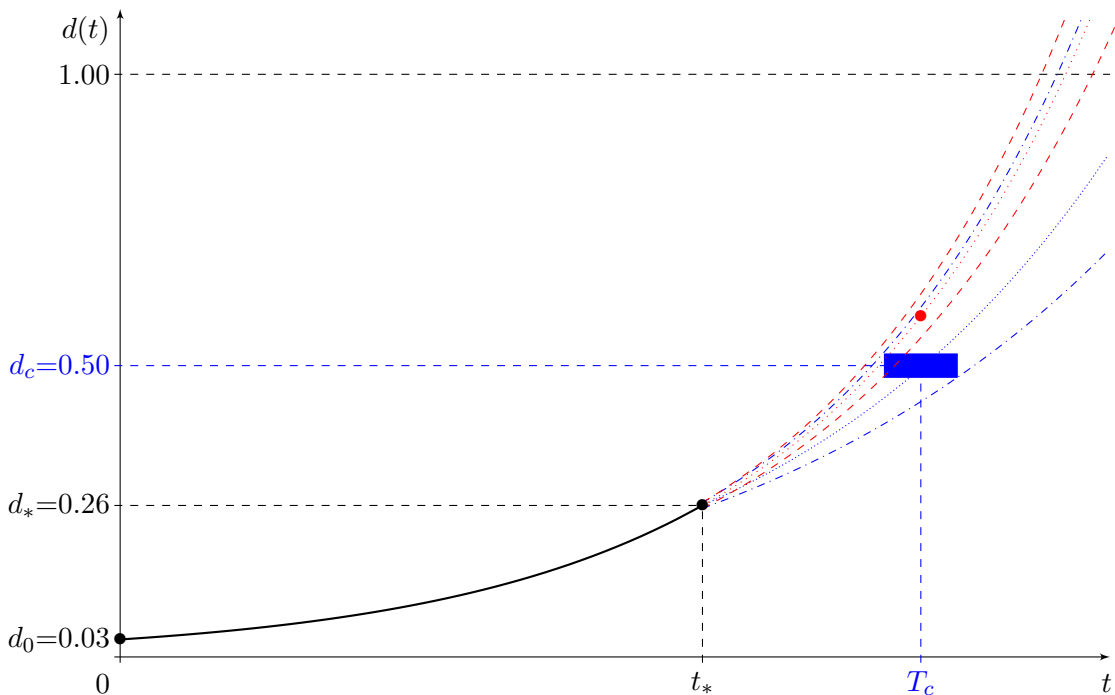


Рис. 4: Прогноз роста дефекта на основании *интервального представления* экспертного мнения: «**Критическое значение** $d_c = 0.50 \pm 0.02$ *глубины дефекта* будет достигнуто на отрезке времени $T_c \pm \Delta T$ ».

3.2 *Нечёткое представление* экспертного мнения

- b) Критическое значение *глубины дефекта*, **нечётко** соответствующее $d_c \pm \Delta d$, будет достигнуто, **highly-likely**, в момент времени $T_c \pm \Delta T$.

В этом случае вместо классического множества (прямоугольник — декартово произведение двух интервалов) нужно использовать нечёткое множество («нечёткий прямоугольник» — декартово произведение двух нечётких интервалов):

- нечёткий интервал, заданный ФПВ нормального распределения на Рис. 3 (b), который (приблизительно) соответствует $T_c \pm \Delta T$;
- нечёткая версия критического значения $d_c \pm \Delta d$ *глубины дефекта*, заданная аналогичной непостоянной ФПВ.

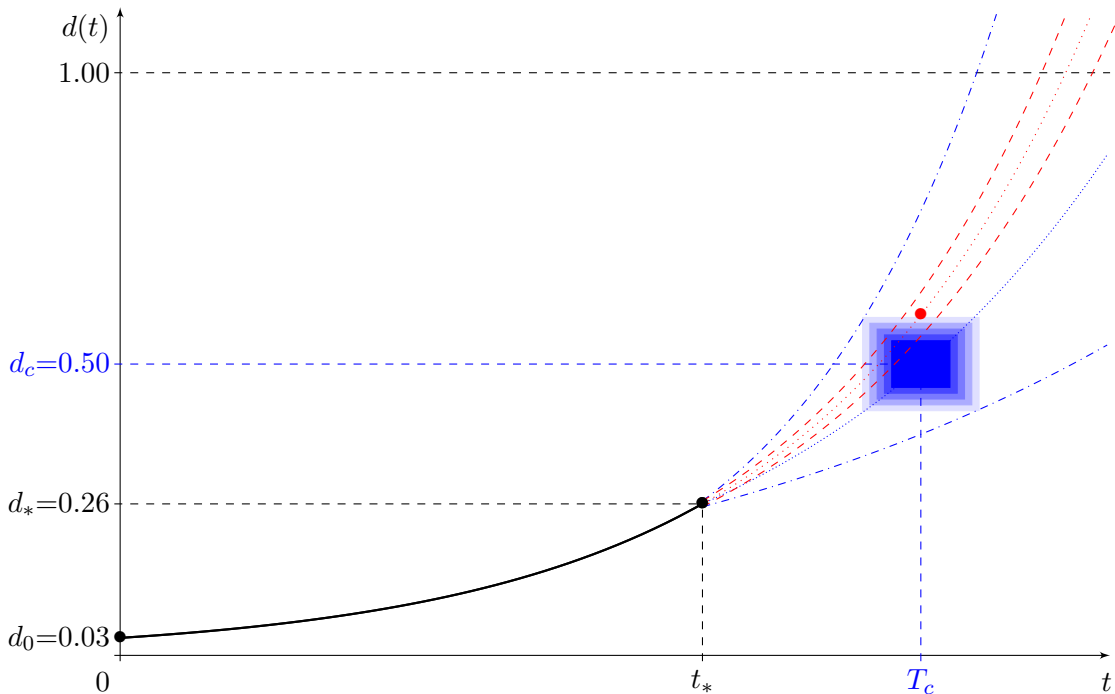


Рис. 5: Прогноз роста дефекта на основании *нечёткого представления* экспертного мнения. Верхняя и нижняя пунктирные линии могут быть построены аналогично, вероятности этих траекторий близки к нулю

Учёт n экспертных мнений

Имея n экспертных мнений можно рассчитать n значений *параметра роста* K_i конкретного дефекта и получить n функций для *глубины дефекта*:

$$d_i(t) = d_0 e^{K_i t}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Глубину дефекта можно спрогнозировать как взвешенную сумму

$$d(t) = q_0 d_0 e^{K t} + \sum_{i=1}^n q_i d_i(t), \quad \text{где} \quad q_0 + q_1 + \dots + q_n = 1.$$

Здесь q_0 — коэффициент доверия результатам ВТД;

q_i — коэффициенты доверия каждому i -му эксперту, $i = 1, \dots, n$.

Как выглядит нечёткая глубина дефекта

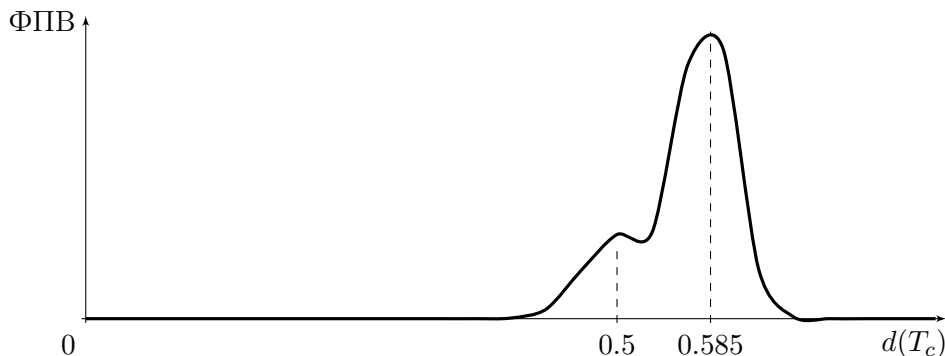


Рис. 6: Нечёткая *глубина дефекта* (ФПВ): значение *глубины дефекта*, равное 0.585, имеет наибольшую вероятность; согласно экспертному мнению, значение 0.5 также имеет заметную вероятность

Выводы

1. Качественная внутритрубная диагностика (ВТД) **крайне важна** для обеспечения безаварийной работы трубопровода. Проведённая квалифицированными специалистами, она позволяет получать наиболее точные данные о развитии всех дефектов.
2. Классические вероятностные методы дают *точечные оценки*, в то время как использование нечётких величин (а также теории возможностей вместо теории вероятностей) даст оценки величин в виде *функции плотности вероятности*.
3. Нечёткая оценка *глубины каждого дефекта*, полученная на основании данных именно о конкретном дефекте (вместо усреднённых по всей трубе данных) обеспечит более точное прогнозирование плановых ремонтов.

Список литературы

- [1] Timashev S., Bushinskaya A. Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. — Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [2] Гетманский М.Д., Житников Ю.В. и др. Организация системы контроля технического состояния промышленных трубопроводов... // Территория нефтегаз. — 2007. — №4. — С. 50–55.
- [3] Baudrit C., Dubois D., Perrot N. Representing parametric models tainted with imprecision // Fuzzy Sets and Systems. — 2008. — Vol. 159, pp. 1913–1928.
- [4] Dubois D. Possibility Theory and Statistical Reasoning // Computational Statistics and Data analysis. — 2006. — Vol. 51, pp. 47–69.
- [5] Baraldi P., Compare M., Zio E. Uncertainty treatment in expert information systems for maintenance policy assessment // Applied Soft Computing. — 2014. — Vol. 22. — Pp. 297–310.

Спасибо за внимание