



# **Введение в метод контроля дальним полем RFT**

## **Общая концепция**



# Обозначения и сокращения

Метод дальнего поля = RFT – Remote Field Testing

HØ – наружный диаметр

BØ – внутренний диаметр

TSP, TS сигнал – сигнал от опорной плиты (Tube Support Plate), вызванный экранированием и ослаблением дальнего поля большим объёмом металла вокруг трубы

Lift off – термин используемый в англоязычной технической литературе и программном обеспечении, означает:

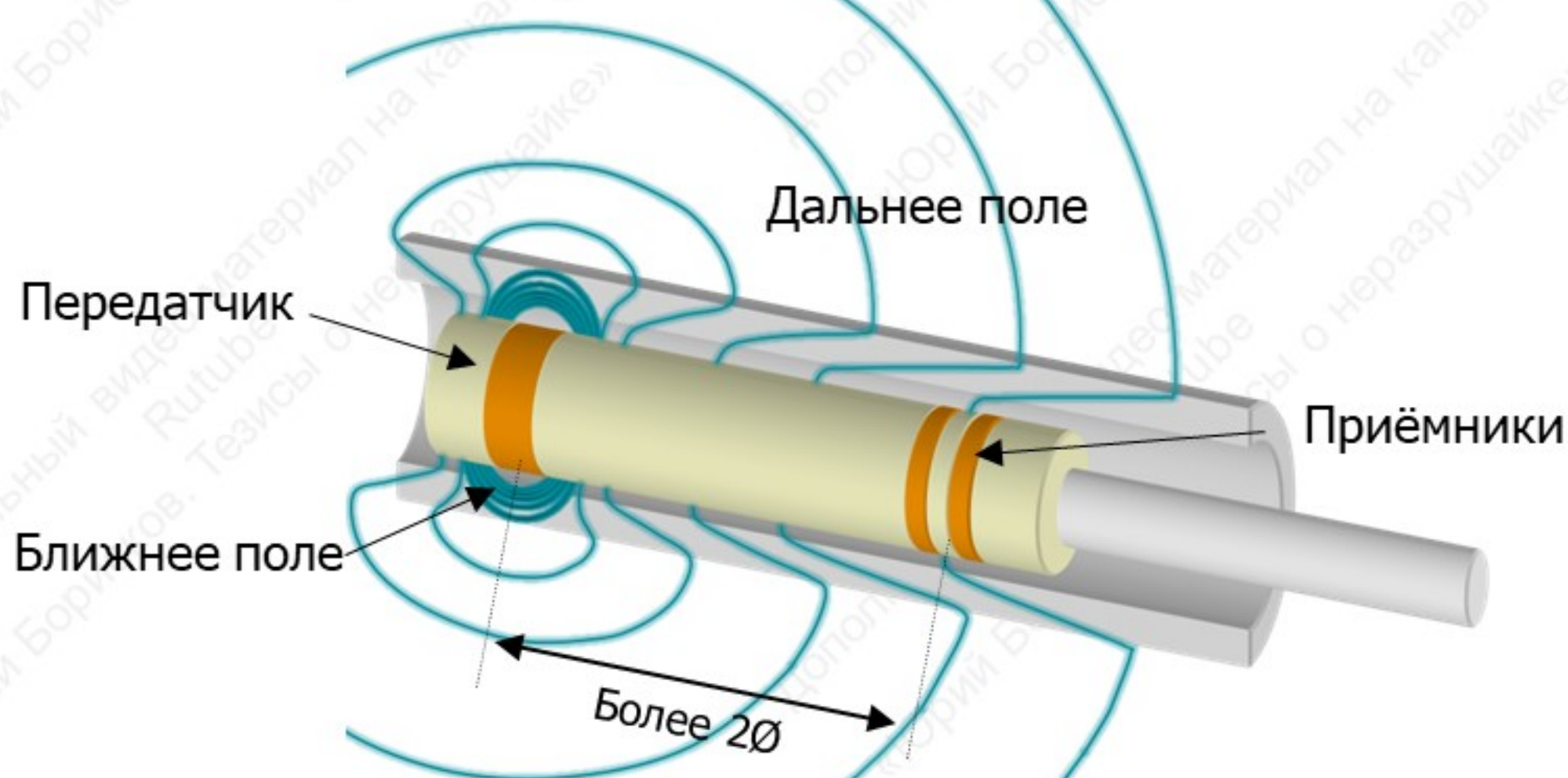
- зазор между катушкой зонда и металлом;
- полный отрыв катушки зонда от металла, в зависимости от контекста.

Базовая конструкция зонда включает одну катушку передатчик и две приемные катушки.

Излучение зонда состоит из двух основных полей, связывающих между собой передатчик и приёмник:

- ближнее поле сосредоточено вокруг передающей катушки и быстро затухает с увеличением расстояния вдоль трубки.
- дальнее поле, которое выходит наружу сквозь стенку трубки, распространяется вдоль оси трубки, а затем снова проникает обратно сквозь стенку трубки внутрь.

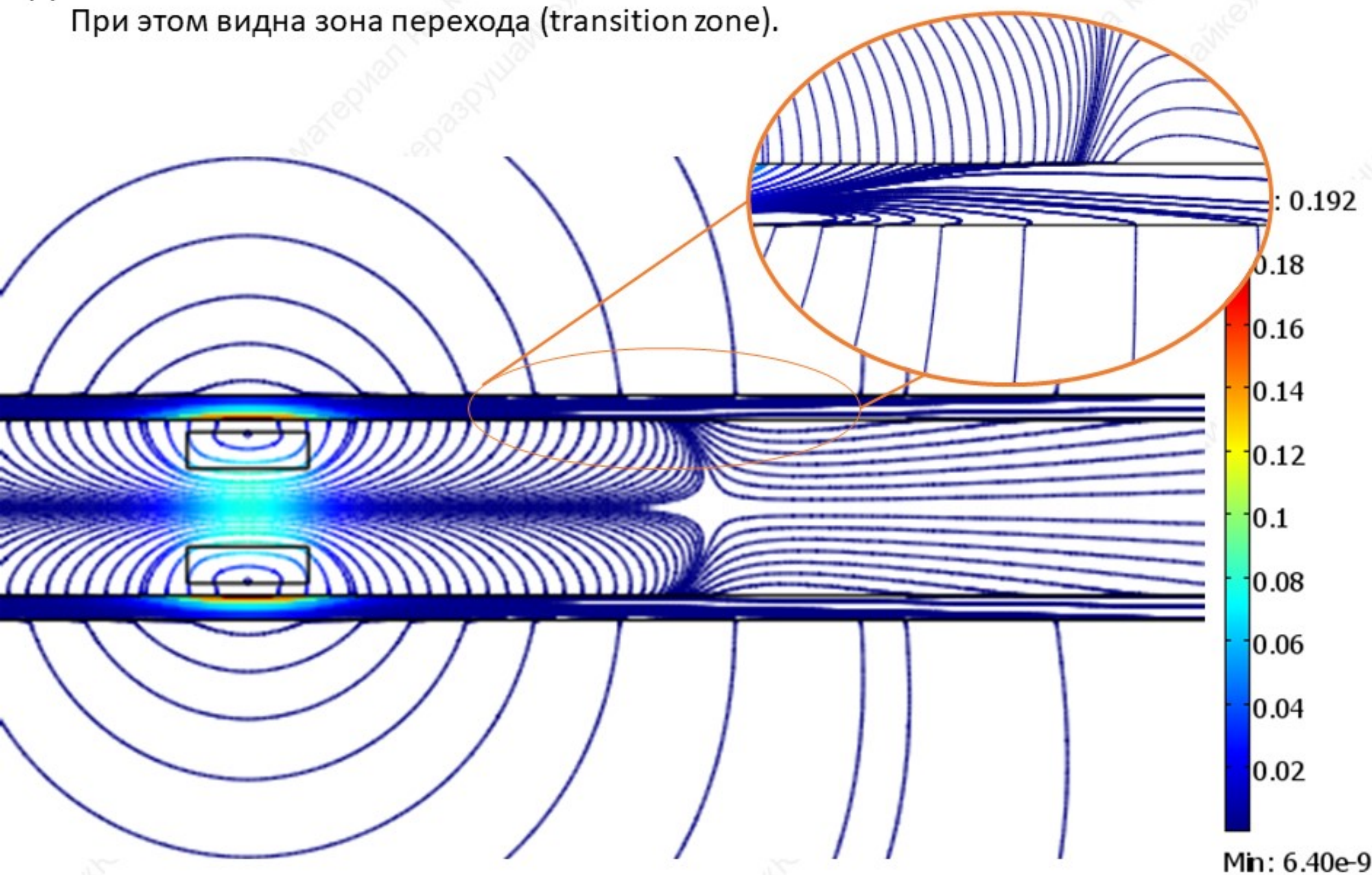
Пространство, в котором дальнее поле доминирует является зоной дальнего поля (remote field zone). Это пространство распространяется на расстояние более двух диаметров трубки от катушки передатчика.





Модель зонда дальнего поля (RFT) показывает распространение и затухание поля в трубке.

При этом видна зона перехода (transition zone).





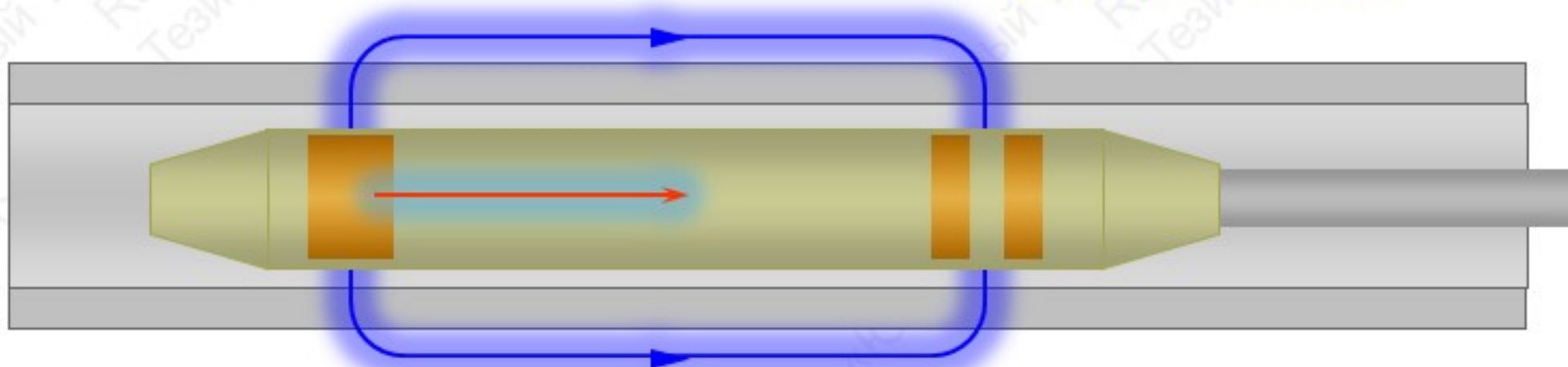
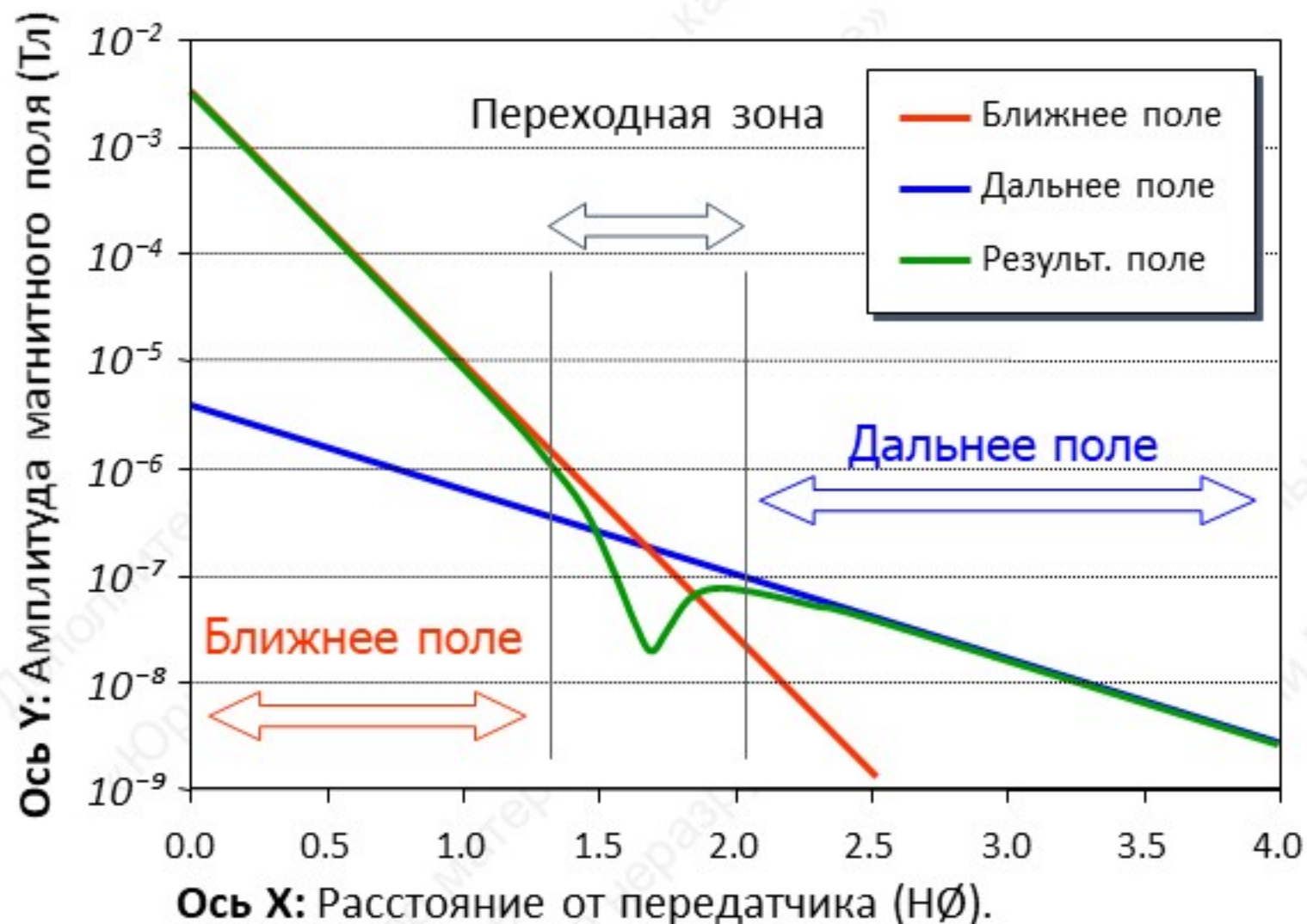


# Общая концепция

График демонстрирует затухание магнитного поля по мере его удаления от передатчика.

Слева у передающей катушки поле очень сильное - это ближнее поле. По мере удаления вдоль трубки поле быстро затухает на несколько порядков. Это видно по резкому падению кривой в переходной зоне.

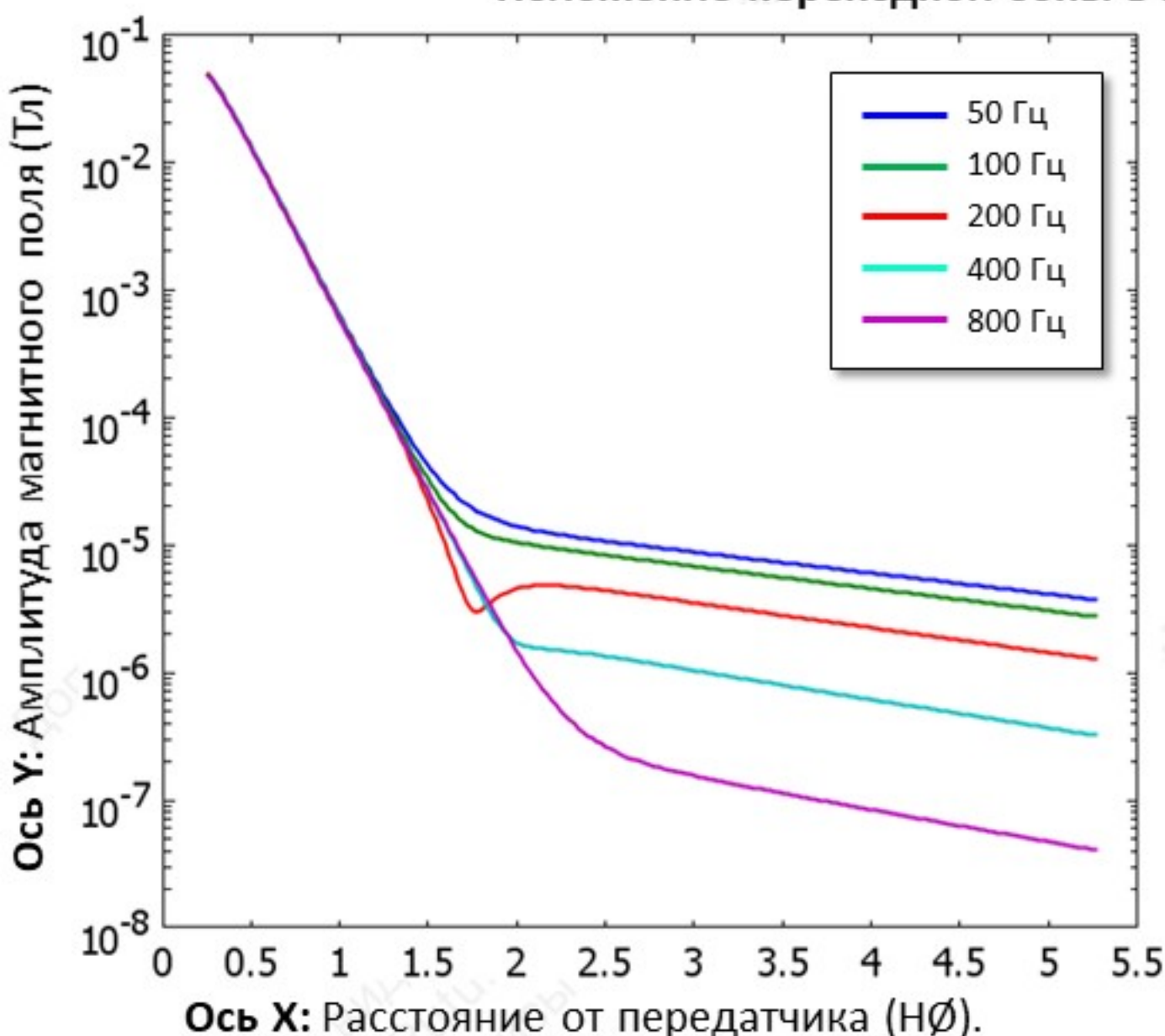
Справа в дальней зоне поле стабилизируется на очень низком уровне и улавливается приёмниками зонда RFT. Сигнал в дальней зоне очень слабый, однако именно этот ослабленный сигнал, прошедший дважды через стенку трубки, несет в себе информацию о ее состоянии (толщине, дефектах).







## Положение переходной зоны в зависимости от частоты.



Модель трубки 19 мм наружного диаметра со стенкой толщиной 2,11 мм.

Параметры моделирования:

- $f$  = переменная (частота)
- $\mu_r = 150$  (относительная магнитная проницаемость)
- $\sigma = 7 \times 10^6$  См/м (электропроводность)
- коэффициент заполнения = 0,75

При низкой частоте зона дальнего поля начинается максимально близко к передатчику. Поле распространяется далеко без сильного затухания. По мере роста частоты зона дальнего поля смещается вправо, дальше от передатчика. Поле затухает быстрее ближе к передатчику.

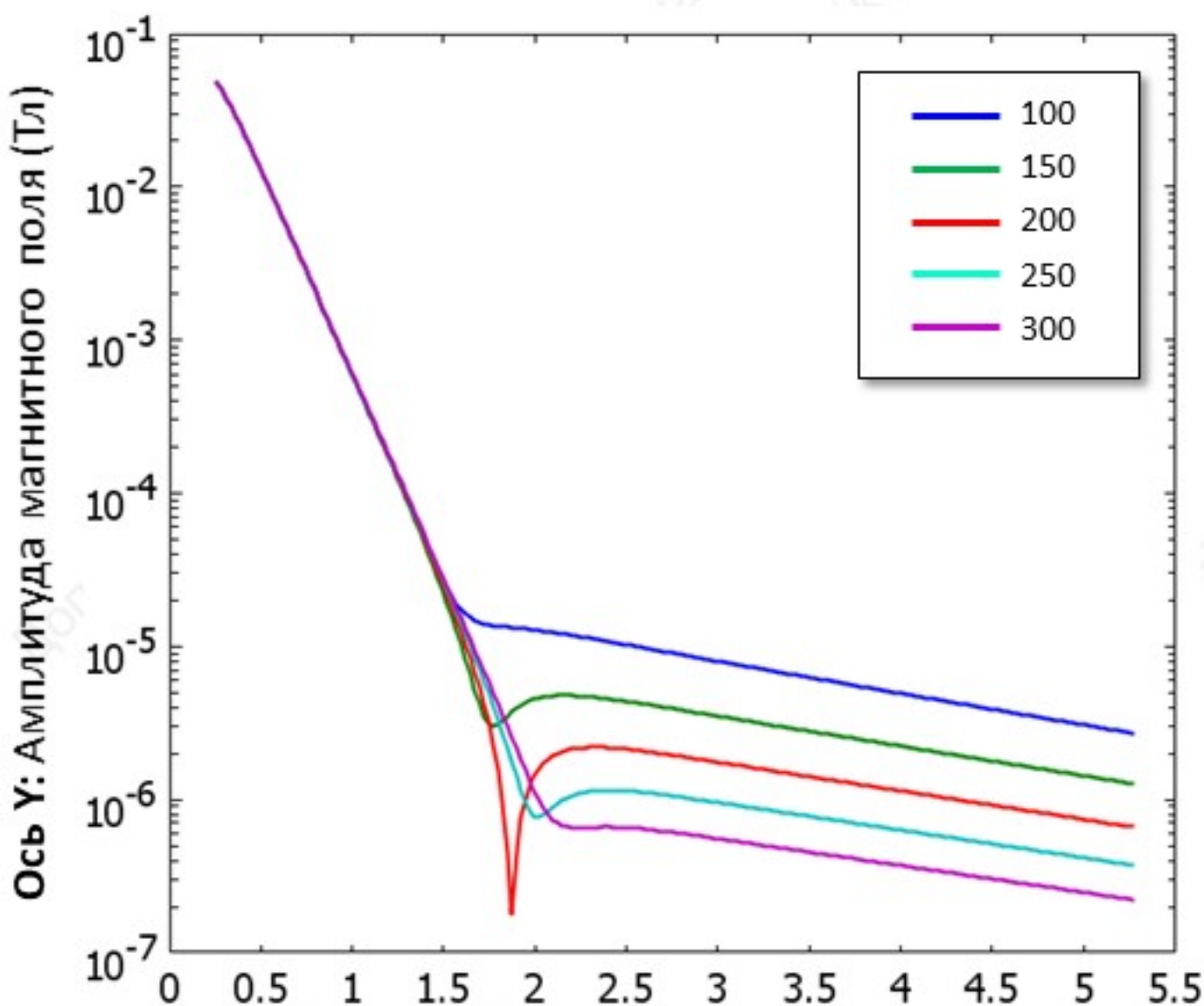
Это объясняется скин-эффектом. Выше частота - меньше глубина проникновения поля в материал. Поле сильнее «концентрируется» у поверхности и быстрее затухает внутри стенки. В результате требуется пройти большее расстояние вдоль трубы, чтобы выйти наружу и снова проникнуть внутрь, достигнув приёмников.

Практический вывод: Выбор частоты — это компромисс. Низкая частота дает сильный сигнал, но маленький фазовый сдвиг (хуже измерения глубины дефекта). Высокая частота дает большой фазовый сдвиг, но ослабляет сигнал. Чтобы добиться правильной работы зонда (чтобы приемные катушки находились в зоне дальнего поля), для трубок с разными свойствами (толщина, материал) необходимо правильно подбирать частоту возбуждения.



# Общая концепция

## Положение переходной зоны в зависимости от магнитной проницаемости.



**Ось X:** Расстояние от передатчика (HØ).

**Практический вывод:** При настройке системы RFT для труб из материала с неизвестной или переменной магнитной проницаемостью может потребоваться поправка частоты или замена типа зонда для обеспечения правильного положения приемных катушек относительно передатчика.

Модель трубки 19 мм наружного диаметра со стенкой толщиной 2,11 мм.

Параметры моделирования:

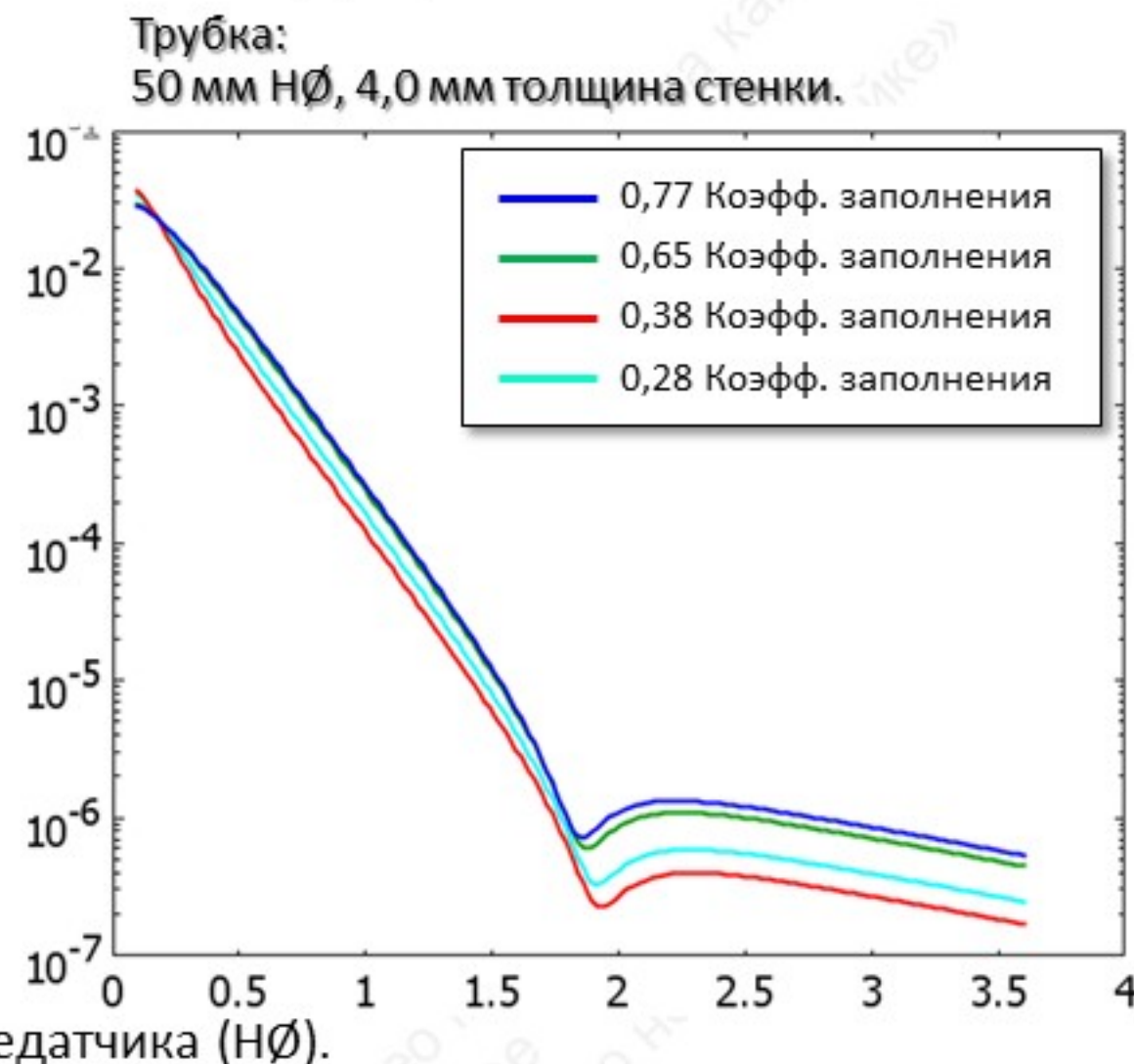
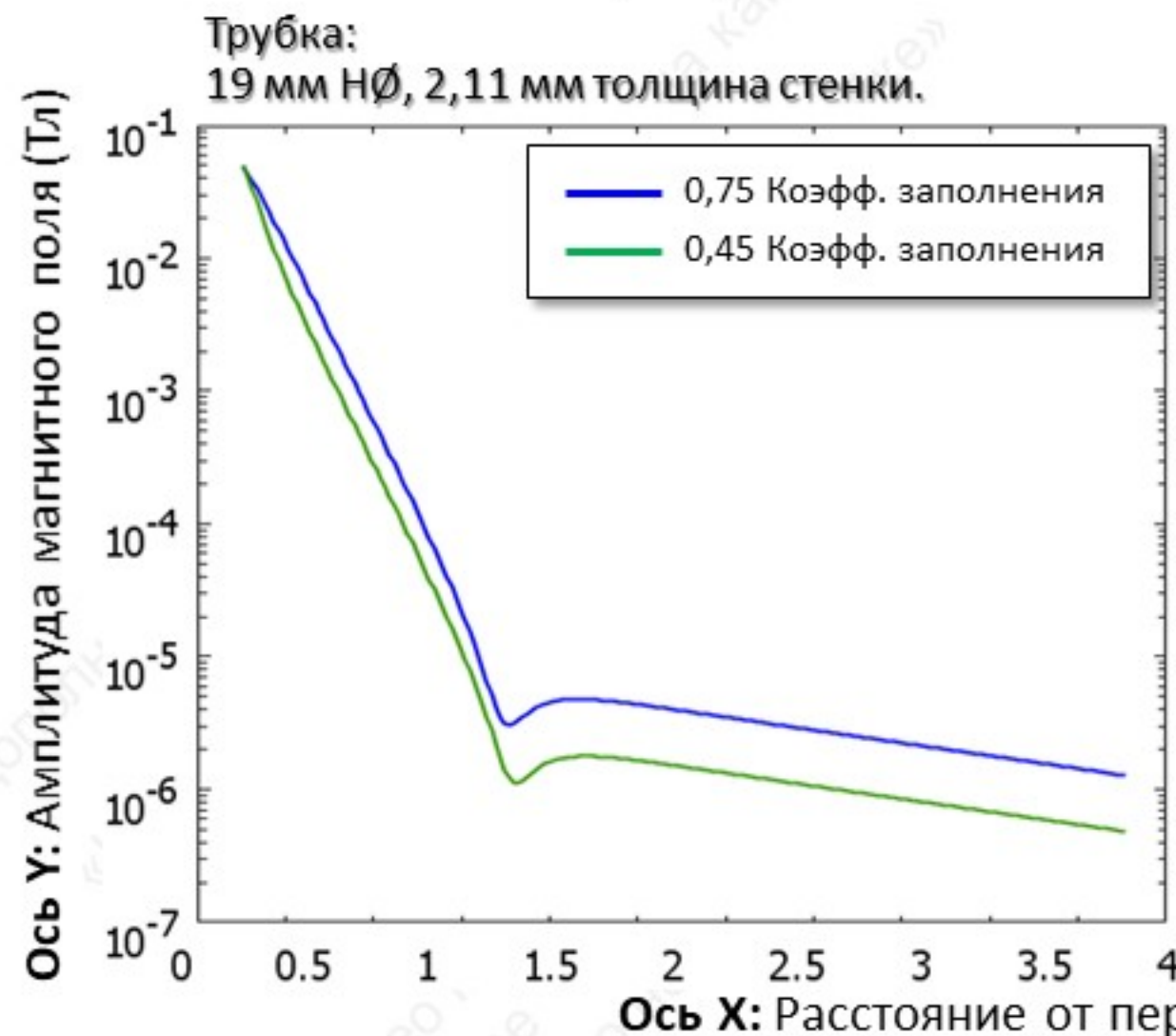
- $f = 200$  Гц (частота)
- $\mu_r$  = переменная (относительная магнитная проницаемость)
- $\sigma = 7 \times 10^6$  См/м (электропроводность)
- коэффициент заполнения = 0,75

При низкой проницаемости зона дальнего поля, где доминирует полезный сигнал, прошедший через стенку, начинается близко к передатчику. По мере роста магнитной проницаемости эта зона последовательно смещается все дальше от передатчика. Потому, что более высокая магнитная проницаемость сильнее ослабляет электромагнитное поле, вынуждая его проходить большее расстояние внутри стенки трубы.





## Положение переходной зоны в зависимости от коэффициента заполнения.



Чем меньше коэффициент заполнения, тем зонд сильнее смещен от центра трубки, тем более асимметричное поле, что может влиять на форму и четкость сигналов от дефектов. Однако, метод RFT менее нечувствителен к смещению переменному зазору по сравнению с другими вихретоковыми методами. На графиках видно, что метод сохраняет работоспособность даже при неидеальном коэффициенте заполнения.

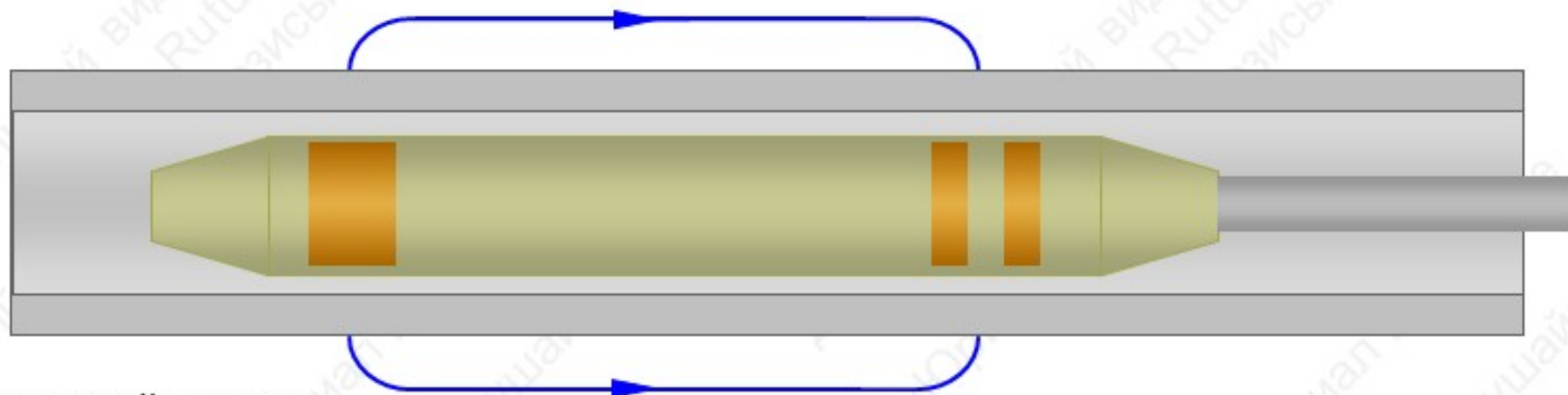
Практический вывод: метод RFT хорош при контроле изогнутых или загрязненных труб, где идеальная центрация невозможна. Но для наиболее точных результатов рекомендуется стремиться к лучшему коэффициенту заполнения.



Любой параметр, который смещает переходную зону дальше от передатчика влияет на качество принимаемого сигнала.

Электропроводность ( $\sigma$ ): Чем выше проводимость материала трубки, тем сильнее в нем индуцируются вихревые токи, которые активнее противодействуют и ослабляют первичное поле передатчика. Это приводит к более сильному затуханию и смещению зоны RFT.

Толщина стенки ( $d$ ): Чем толще стенка, тем большее расстояние требуется пройти магнитному полю через металл, дважды: выйти из передатчика за пределы трубки и снова проникнуть внутрь трубки на приёмник. При этом затухая от взаимодействия с материалом.



## Практический вывод:

Поскольку проводимость ( $\sigma$ ) и магнитная проницаемость ( $\mu$ ) — это свойства материала, которые дефектоскопист не может изменить, основным инструментом настройки системы является частота возбуждения передатчика зонда.

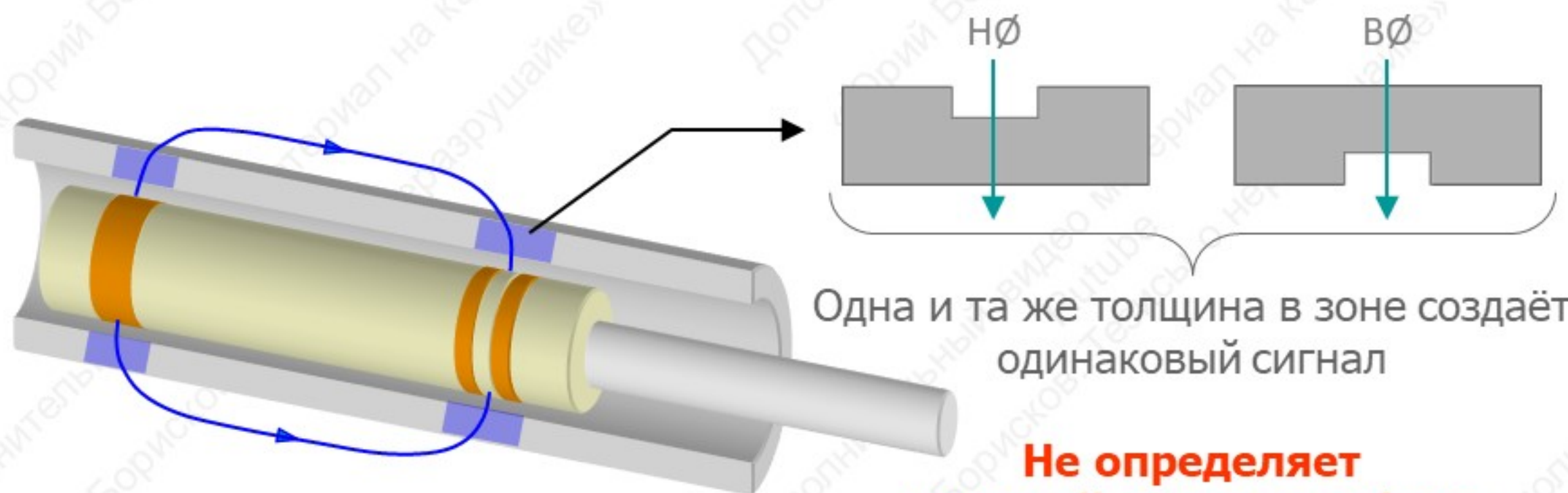
Если зона RFT ушла слишком далеко (например, из-за высокой проводимости или толстой стенки), можно понизить частоту, чтобы сместить зону RFT ближе к приёмникам.

Если зона RFT слишком близка (например, в тонкостенных или малопроницаемых трубках), можно повысить частоту, чтобы сместить зону RFT ближе к приёмникам и добиться оптимального фазового сдвига для точного измерения глубины дефектов.



RFT — это метод сквозной передачи, при котором магнитное поле дважды проходит через стенку трубы: один раз в зоне нахождения передатчика и один раз в зоне нахождения приёмника. Любой дефект, расположенный в этих двух зонах, будет влиять на магнитное поле, получаемое приёмником.

Приёмник измеряет всю толщину материала, через который прошло магнитное поле. По этой причине метод RFT не может разделять дефекты внутренней ( $B\emptyset$ ) и наружной ( $H\emptyset$ ) поверхности. Приёмник измеряют только общую толщину материала.



Одна и та же толщина в зоне создаёт одинаковый сигнал

**Не определяет  
на какой стороне дефект**





Для анализа сигнала полезно **уравнение глубины скин-слоя\***, поскольку они близко описывают поведение сигналов в RFT методе при сквозном прохождении через стенку трубы.

Приемные катушки воспринимают сигнал, который претерпел фазовый сдвиг (задержку по времени) и затухание.

Фазовый сдвиг ( $\phi$ ) пропорционален толщине стенки трубы ( $d$ ), частоте возбуждения ( $f$ ), магнитной проницаемости ( $\mu$ ) и электропроводимости материала трубы ( $s$ ).

**Сила магнитного поля** снижается экспоненциально с увеличением толщины стенки трубы ( $d$ ).

\* - скин-слой это эффект уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящего материала. В результате этого эффекта, например, переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое.

$$\phi = d \sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}$$

$\mu = \mu_0 \mu_r$  = магнитная проницаемость

$d$  = толщина стенки

$f$  = частота

$\sigma$  = электропроводимость

$$B = B_0 e^{-\phi} = B_0 e^{-d \sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}}$$

$B_0$  = начальная напряжённость магнитного поля

$B$  = напряжённость магнитного поля на глубине, соответствующей фазовому сдвигу ( $\phi$ )

$\phi$  = фазовый сдвиг

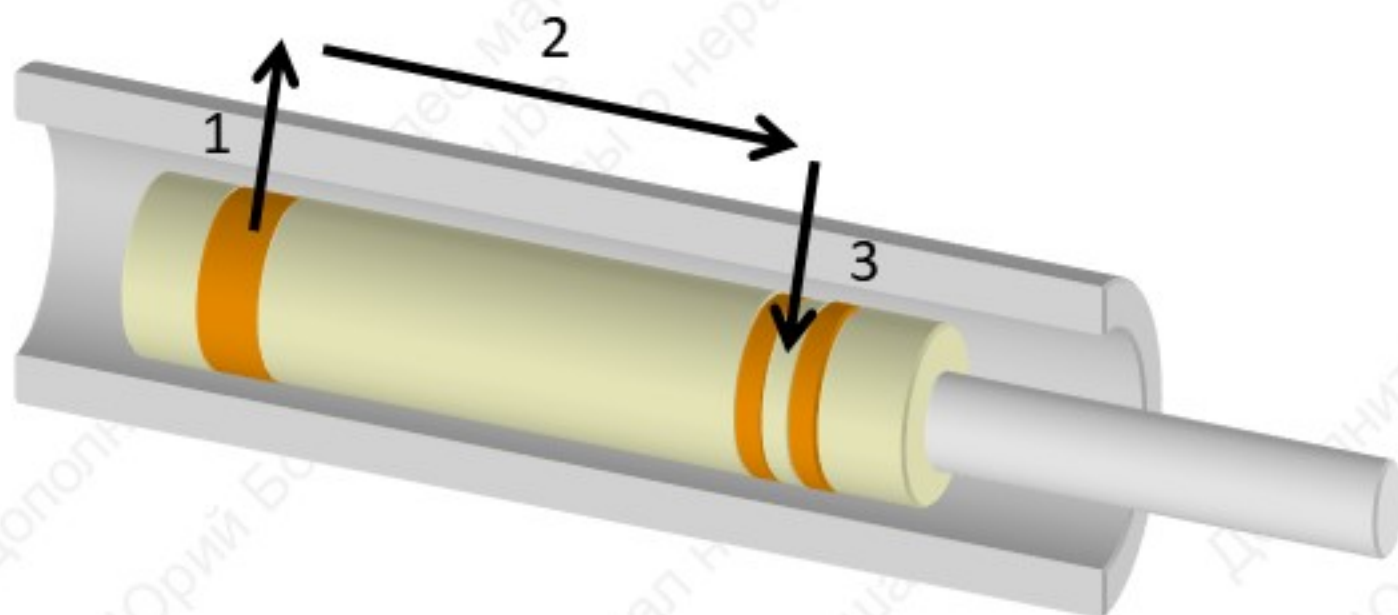


# Общая концепция. Спираль затухания

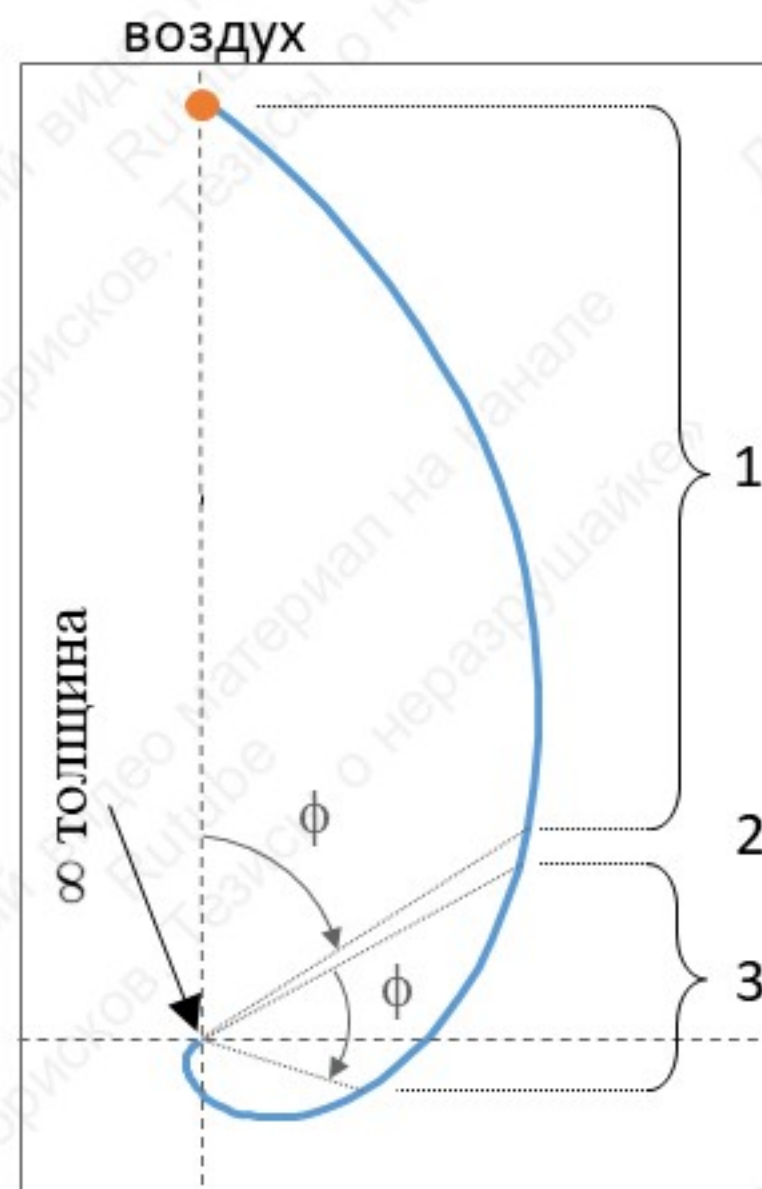
Чтобы показать сквозную передачу, описываемую уравнениями скин-слоя\* используется полярная диаграмма или комплексная плоскость.

$$\phi = d \sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}$$

$$B = B_0 e^{-\phi}$$



\* - скин-слой это эффект уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящего материала. В результате этого эффекта, например, переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое.







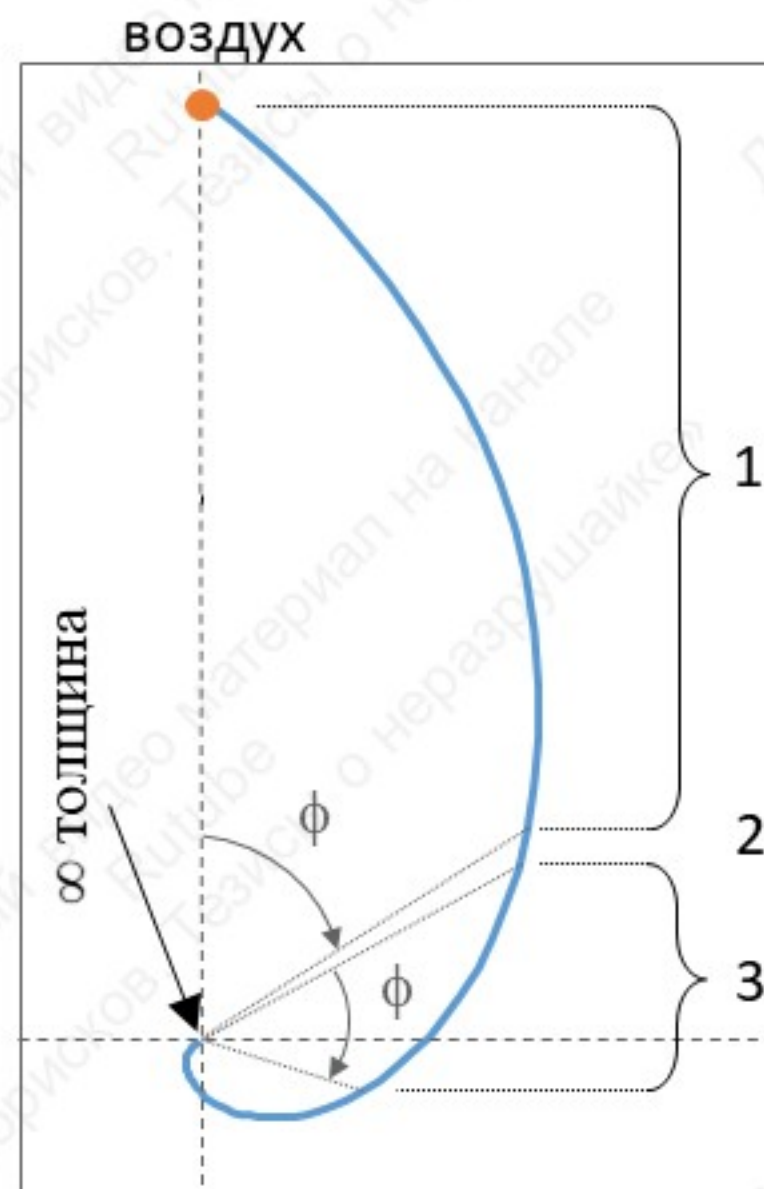
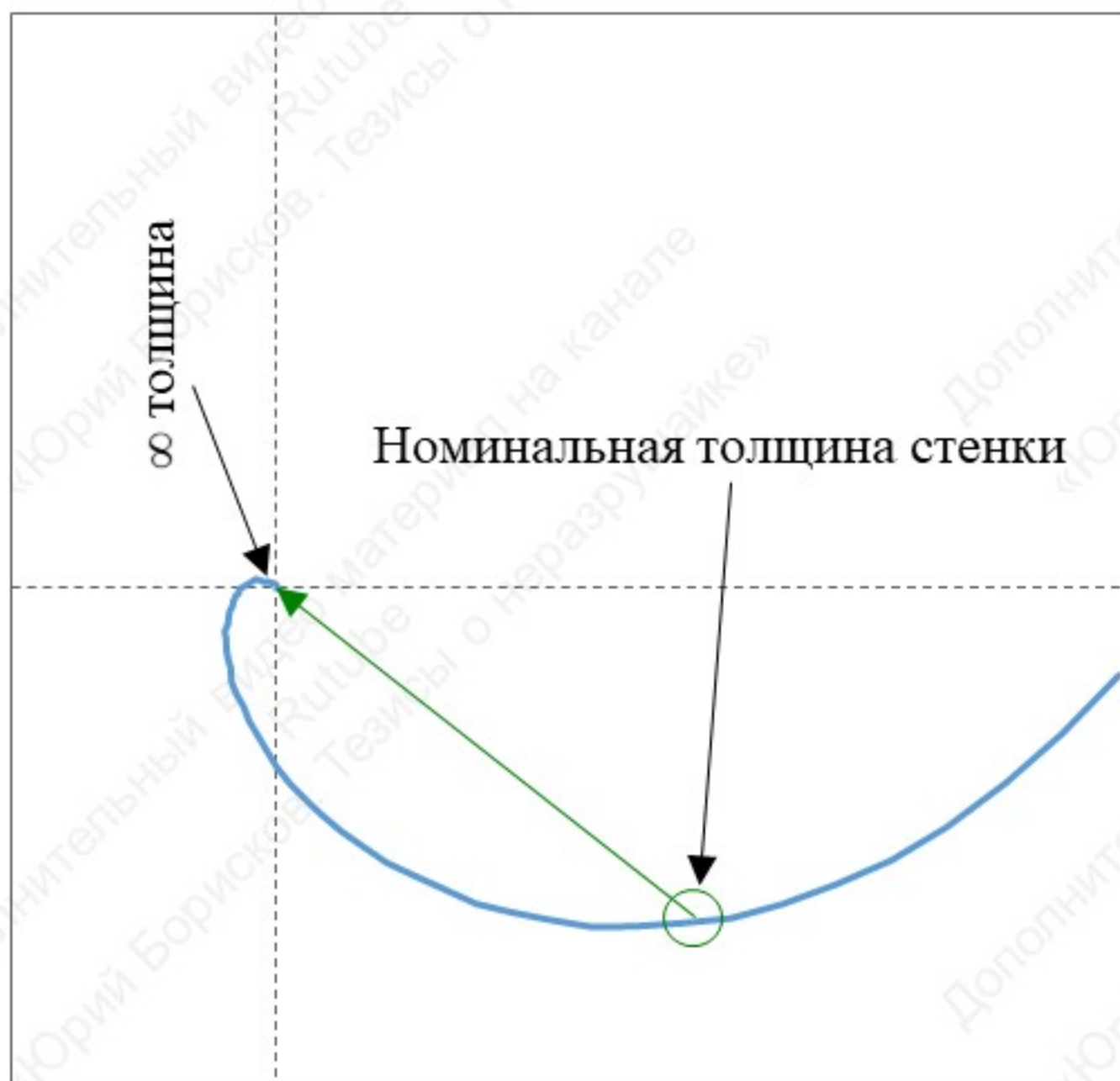
# Общая концепция. Спираль затухания

Каждая точка на спирали представляет различную толщину стенки трубы ( $d$ ). Когда толщина стенки  $d$  увеличивается:

- фазовый сдвиг ( $\phi$ ) увеличивается — точка поворачивается по часовой стрелке.
- амплитуда поля ( $B$ ) экспоненциально уменьшается — точка приближается к центру диаграммы.

$$\phi = d \sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}$$

$$B = B_0 e^{-\phi}$$





# Общая концепция. Спираль затухания

Спираль затухания представляет сигнал от одного приёмника (ABS – абсолютный канал).

Начало спирали – это нулевой сигнал бесконечной толщины стенки.

На спирали нормализованный ABS-сигнал номинальной толщины стенки располагается на оси X на расстоянии 1 Вольт от нулевого сигнала. Это опорное значение.







# Общая концепция. Спираль затухания

Стандартная глубина проникновения (скин-слоя,  $\delta$ ) определяется, как глубина где интенсивность магнитного поля 37% от его значения на поверхности, а фазовый сдвиг  $57,3^\circ$ .

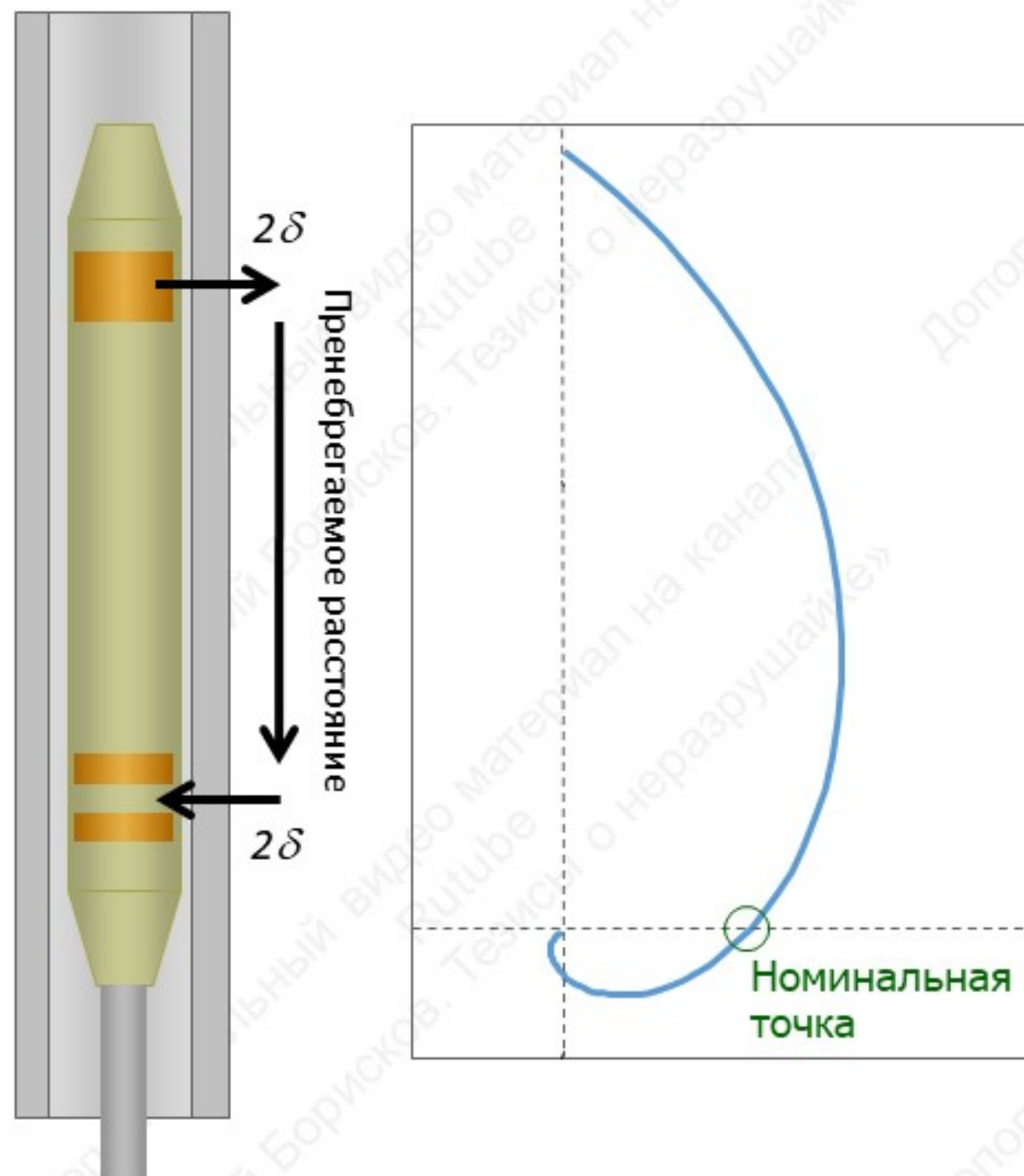
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}}$$

Если  $\delta=1$  мм и толщина стенки  $d=2$  мм, магнитное поле при сквозной передаче составляет  $4\delta$ .

Показания номинальной трубы:

$$B = \exp(-4) = 1,83\%$$

$$\phi = 4 * 57,3^\circ = 229,2^\circ$$





# Общая концепция. Спираль затухания

Если из-за дефекта в зоне приёмника толщина стенки уменьшается до 1 мм, то общая толщина составит  $3\delta$ .

В зоне приёмника:

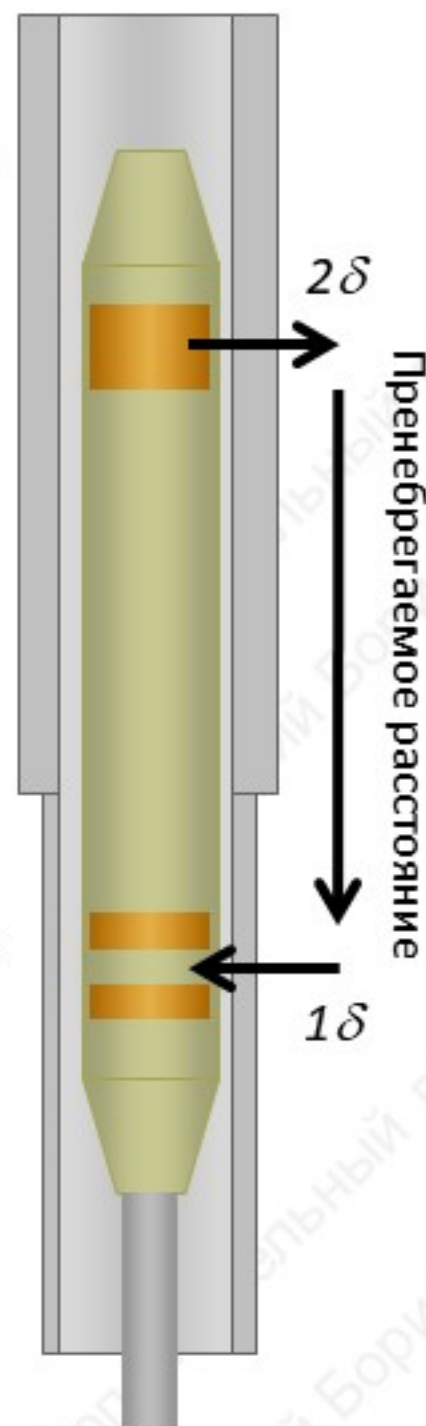
$$B = \exp(-3) = 4,98\%$$

$$\phi = 4 * 57,3^\circ = 171,9^\circ$$

Показания на комплексной плоскости напряжения:

Амплитуда сигнала ( $B$ ) увеличиться в 2,72 раза

Фазовое смещение ( $\phi$ ) уменьшиться на  $57,3^\circ$







# Общая концепция. Сигналы от дефектов

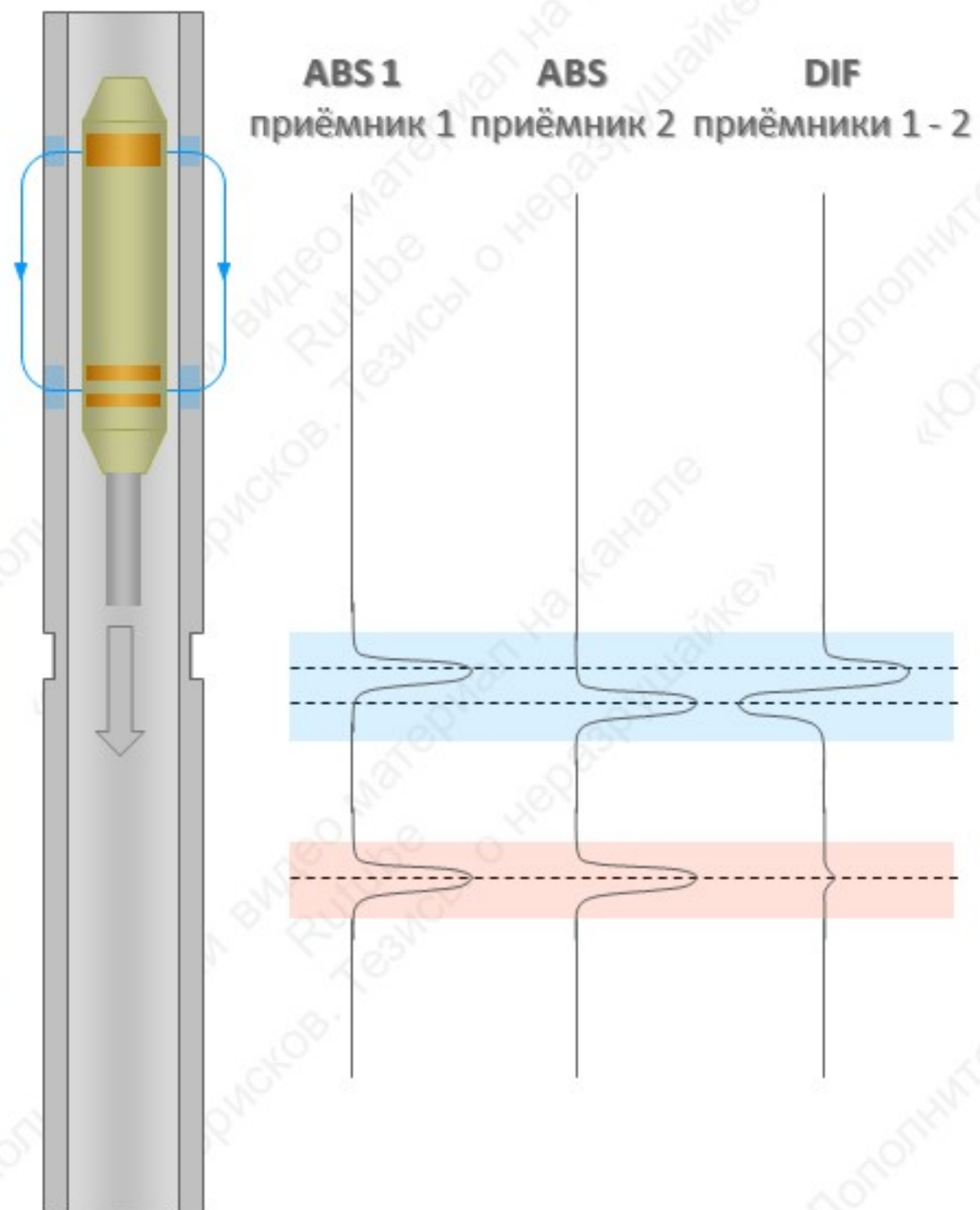
Когда зонд проходит мимо дефекта в трубе, сигнал происходит в виде двух эффектов:

Эффект приемника. Первый приемник получает сигнал во время прохождения мимо дефекта, а затем аналогичный сигнал от второго приёмника. Вычитание сигналов приемников позволяет получить S-образный дифференциальный сигнал (DIFF).

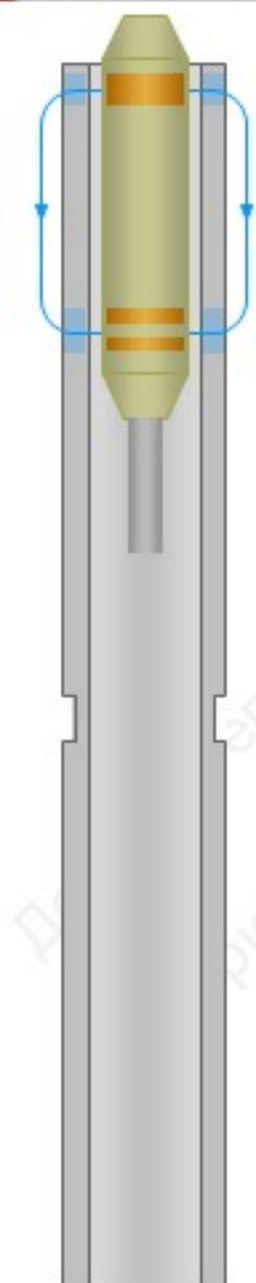
Эффект передатчика. На поле передатчика проходящего мимо дефекта оказывается влияние, которое регистрируют приемники.

На ABS канале оба приёмника работают одновременно и выдают практически идентичные сигналы.

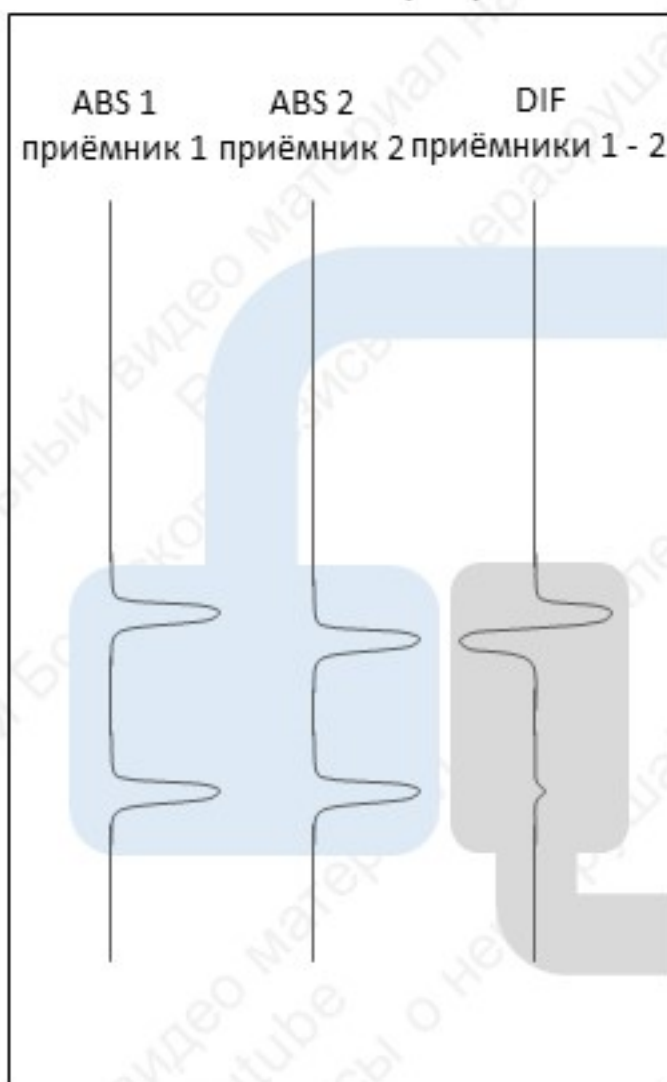
На DIFF канале небольшая разница в расположении приёмников влияет на вычитания сигналов. Если дефект большой по отношению к приёмнику, то фактический сигнал будет на уровне шумов.



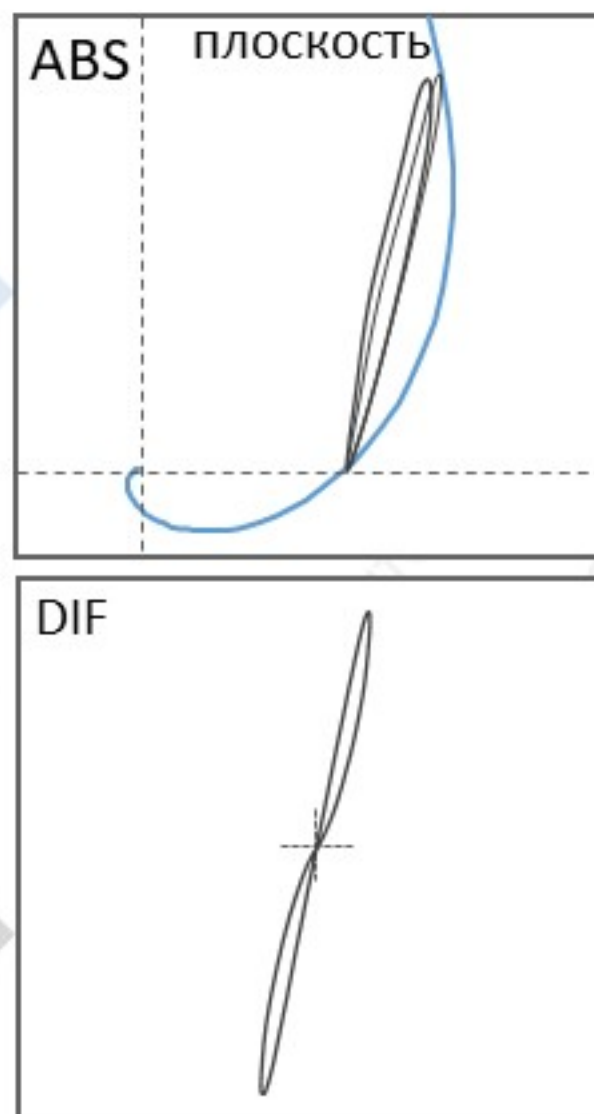
# Общая концепция. Сигналы от дефектов



## Полосовые графики



## Комплексная



**ABS, приёмник 1** - это абсолютный сигнал с первой приемной катушкой. На графике видно, как амплитуда и фаза этого сигнала изменяются, когда катушка проходит дефект.

**ABS, приёмник 2** - это абсолютный сигнал со второй приемной катушки. Катушки разнесены по оси зонда, и сигнал повторяет форму, но с небольшой временной задержкой. Пик сигнала от второй катушки появляется позже.

**DIF, приёмники 1-2** - это дифференциальный сигнал, полученный путем вычитания сигнала второй катушки (ABS 2) из сигнала первой катушки (ABS 1). Этот сигнал имеет характерную S-образную форму. Эта форма является результатом последовательного прохождения дефекта сначала под первым приёмником, а затем под вторым. Дифференциальный сигнал полезен для более точного обнаружения момента прохождения дефекта и снижает влияния некоторых видов шумов.



## Характеристики RFT

1. Подходит для ферромагнитных труб, например, что используются в котлах и теплообменниках.
2. Одинаковая чувствительность к внутренним и внешним дефектам.
3. Метод относительно слабо чувствителен к переменному зазору (Lift off) или колебаниям (биению) зонда.
4. Не требуется высокий коэффициент заполнения, что позволяет проводить контроль частично загрязненных накипью труб, а также котловых труб с изгибами.
5. Центровка зонда не так критична, как при вихретоковом контроле труб из цветных металлов (ЕСТ).
6. Обычная скорость протягивания зонда в трубе: от 0,10 м/с до 0,5 м/с. Скорость зависит комплекса факторов: частоты возбуждения, настройки фильтра и внутреннего состояния трубы. Скорость следует проверять, ориентируясь на сигнал от калибровочной трубки с искусственными дефектами. Если амплитуда сигнала от дефекта уменьшается, это результат превышения скорости протяжки зонда.



## Ограничения

1. Максимальный диаметр трубы для стандартного зонда  $\approx 50,8$  мм (**ASTM E2096/E2096M**). Но возможности метода позволяют проводить контроль диаметров до 200 мм нестандартным (заказным) зондом. При этом с увеличением диаметра катушек зонда пропорционально увеличивается размер минимально выявляемого дефекта. Использование зонда с матрицей в таком случае может повысить разрешение и чувствительность контроля труб большого диаметра, но стоимость зонда значительно возрастёт.
2. Максимальная стандартная толщина стенки 3,4 мм (**ASTM E2096/E2096M**). Однако, возможности метода позволяют обеспечивать контроль толщины до 6,35 мм в углеродистой стали с высокой магнитной проницаемостью и  $\approx 12,7$  мм в ковком и сером чугуна, но потребуются специализированные зонды.
3. Ограниченная чувствительность к малым дефектам под опорными плитами трубных решеток (TSP).
4. Изгибы и вмятины в трубах оказывают влияние на сигнал, в связи с изменением магнитной проницаемости. На этом фоне сигнал от дефекта можно различить, но сложно оценить по размеру.
5. Метод не разделяет положение дефектов относительно ВØ и НØ (**ASTM E2096/E2096M, п. 5.2.1**).





## Введение в метод контроля дальним полем RFT

*Следующий раздел*

### **Оборудование**

