

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРЯМОШОВНОЙ СТАЛЬНОЙ ТРУБЫ



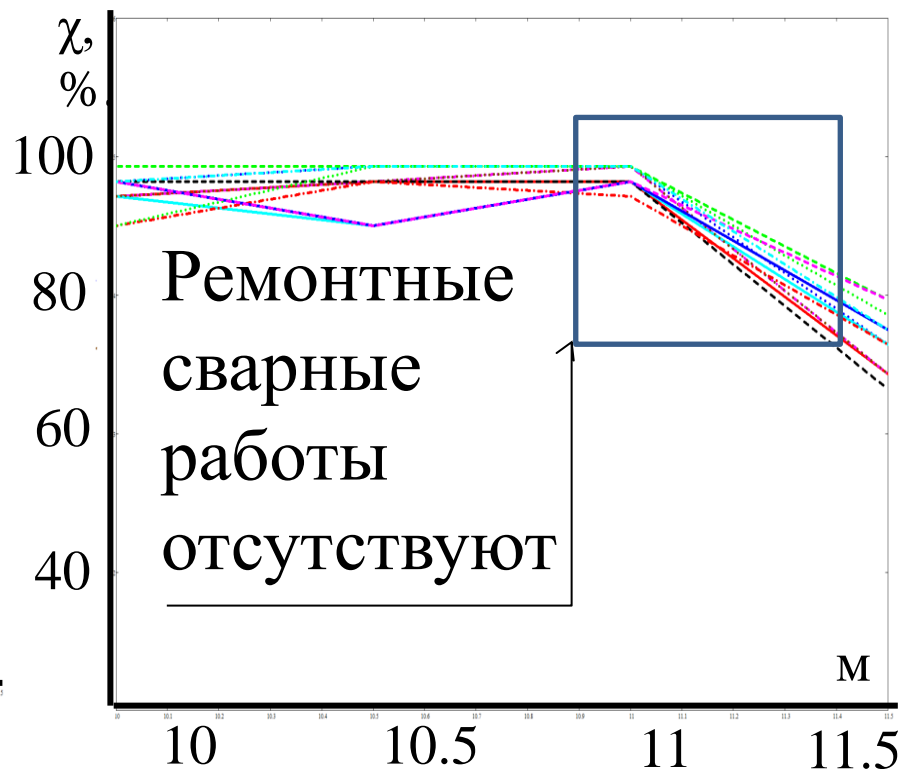
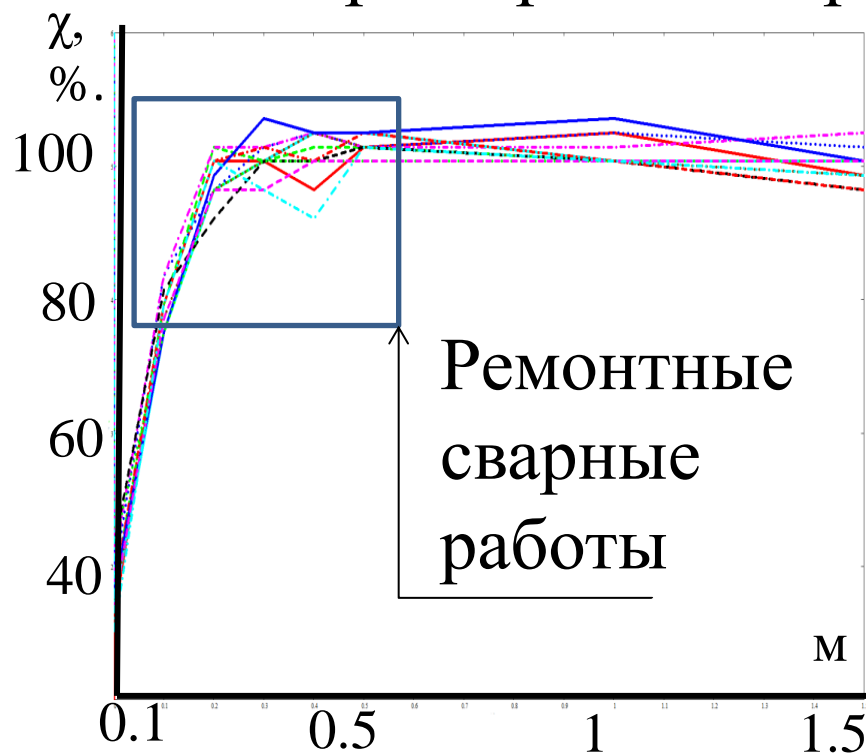
В.С. Стариков (АО ППТР «ПЁТР»)

В.Н. Глазнев (ВГУ)

Задачей нашего исследования являлось изучение магнитных свойств прямошовных стальных труб различных диаметров, используемых при строительстве магистральных нефте- и газопроводов.

Основная цель исследования - уточнение существующих расчётных моделей стальной трубы, основанных на реальных данных о магнитной восприимчивости и намагниченности материала изделия.

Графики относительной магнитной восприимчивости по каждому угловому сектору (шаг 30°) на внешнем примере трубы, характерные для различных диаметров



Участки краевых зон стальной прямошовной трубы:

- Левый график с внешним воздействием;
- Правый график без внешнего воздействия

Результаты исследований магнитной восприимчивости:

1. В краевых зонах отдельно взятой трубы магнитная восприимчивость меньше, чем на любом другом участке.
2. В области продольного сварного шва трубы фиксируется понижение магнитной восприимчивости, по отношению к прилегающим участкам, на 7-15 %. Такие значения восприимчивости показывают, что продольный сварной шов трубы оказывает воздействие на формирование внешнего магнитного поля каждой отдельно взятой трубы.

Результаты исследований магнитной восприимчивости:

3. В случаях заметного износа материала трубы или некачественной проварки шва уменьшение магнитной восприимчивости может достигать 60 % и такие отклонения свойств материала трубы могут выявляться по данным магнитометрии;

4. Воздействие повышенных температур на участке стыковочного шва меняют гомогенное распределение магнитной восприимчивости на 5-10 %, при сварке в условиях промышленного производства, и на 30-60 %, при «ручной» полевой сварке;

Таблица. J_{remxL} , J_{remyL} , J_{remzL} – компоненты векторов остаточной намагниченности; J_{rem} – модуль вектора остаточного намагничивания; J_{ind} – модуль вектора индуктивного намагничивания.

Сектор (градусы)	$J_{rem\ xL}$ (А/м)	$J_{rem\ yL}$ (А/м)	$J_{rem\ zL}$ (А/м)	J_{rem} (А/м)	J_{ind} (А/м)
15	34	6511	8723	10885	2717
45	274	7070	11492	13495	3297
75	142	4288	13033	13721	3130
105	81	5562	12109	13325	3327
135	-29	3671	11024	11619	2937
165	131	5395	8550	10110	2499
195	-52	5096	7829	9342	2552
225	328	6541	8566	10783	2721
255	215	5634	9934	11422	2917
285	120	7813	7701	10971	2951
315	-194	7219	6278	9569	2820
345	-27	7653	5728	9559	2592

Расположение образца
на секторе фрагмента трубы и
локальная правая система координат

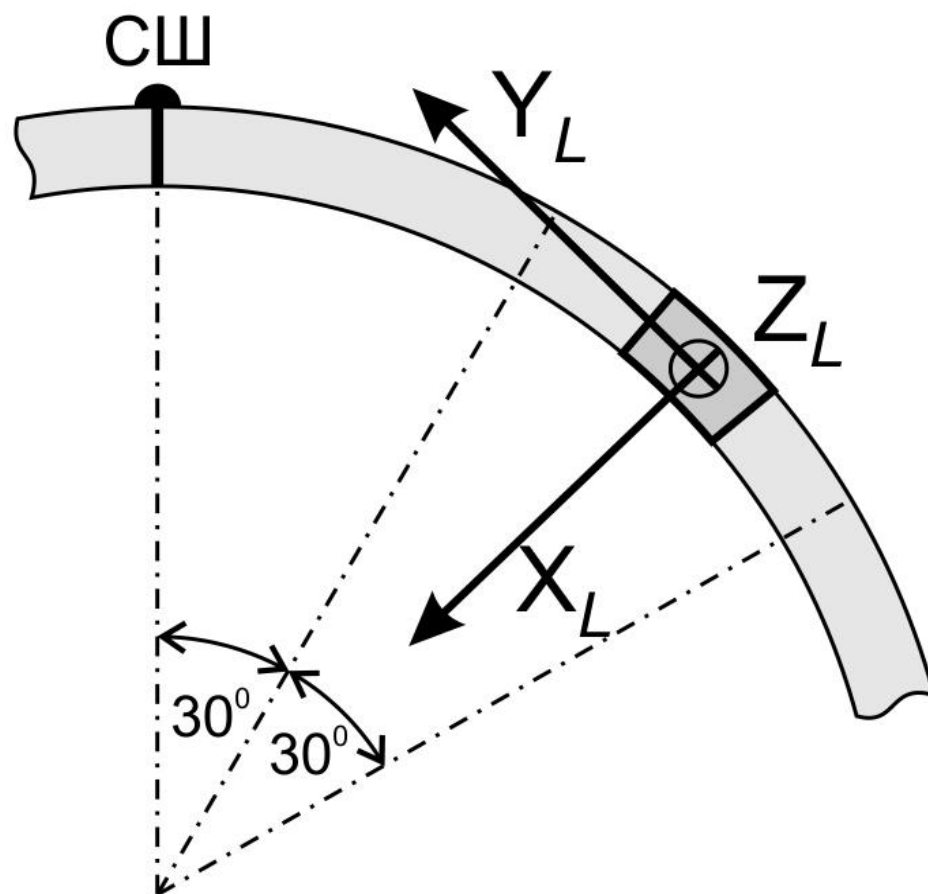
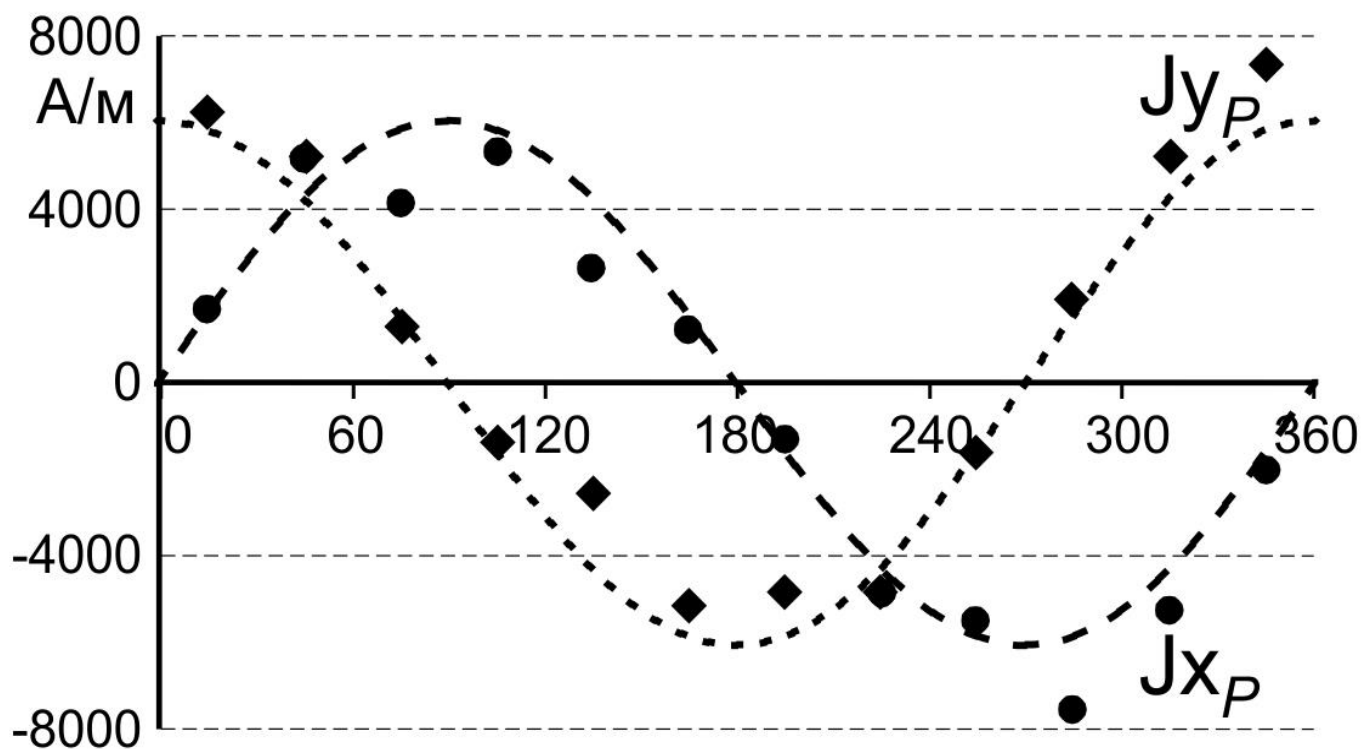


График значений остаточной намагниченности $J_{ХР}$ и $J_{УР}$ в системе координат всего изделия – кольцевого фрагмента стальной прямошовной трубы.



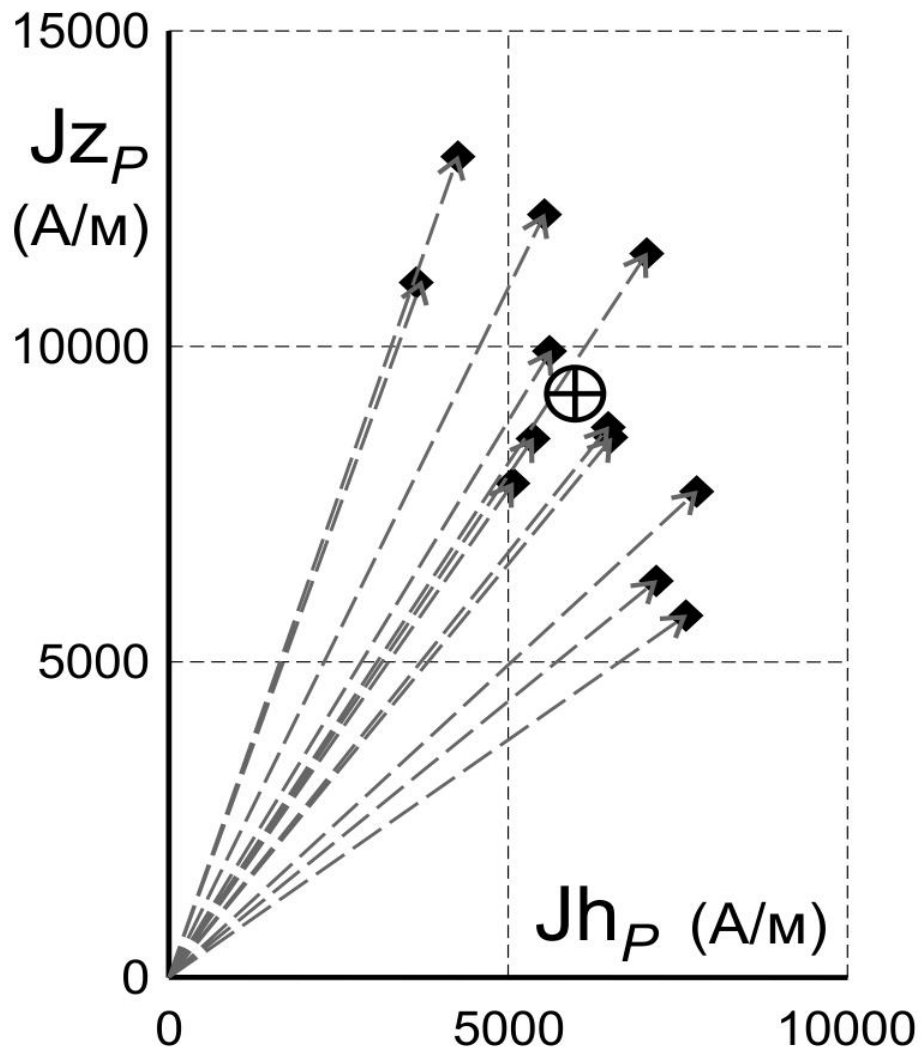
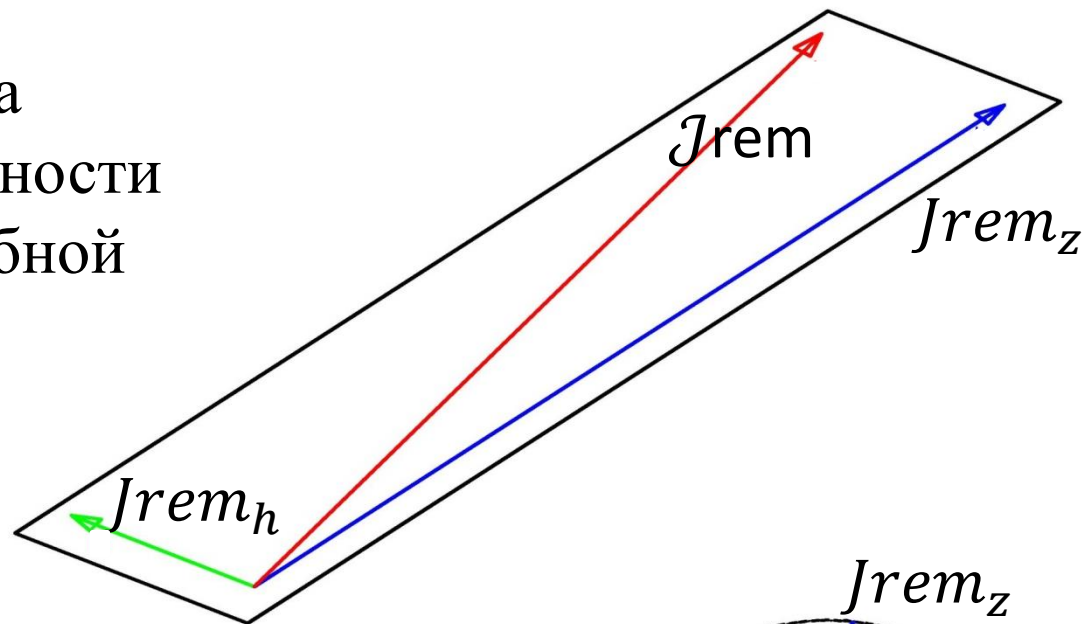
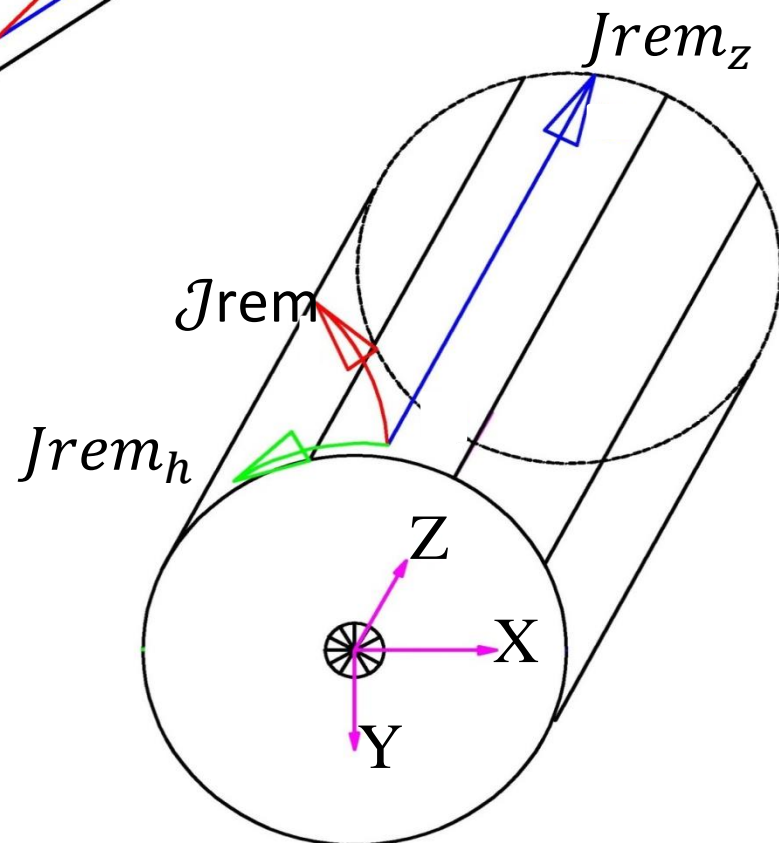


График
 демонстрирующий
 расположение
 векторов остаточного
 намагничения
 материала листовой
 заготовки

Положение вектора
остаточной намагниченности
и его проекций на трубной
заготовке



Положение вектора
остаточной
намагниченности
и его проекций на теле
трубы - готового продукта



Положение проекций вектора индуктивной намагниченности

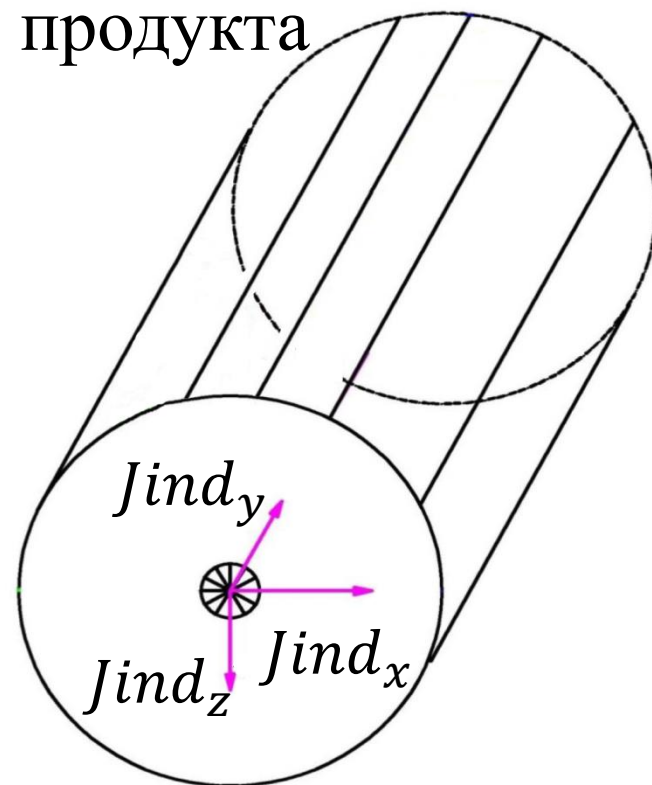
на теле трубы - готового продукта

$$J_{ind_{x,y,z}} = \chi \frac{B_{x,y,z}}{\mu_0}$$

$$B_z = B \sin\left(\phi \frac{\pi}{180}\right)$$

$$B_x = B \cos\left(\phi \frac{\pi}{180}\right) \sin\left(A \frac{\pi}{180}\right)$$

$$B_y = B \cos\left(\phi \frac{\pi}{180}\right) \cos\left(A \frac{\pi}{180}\right)$$

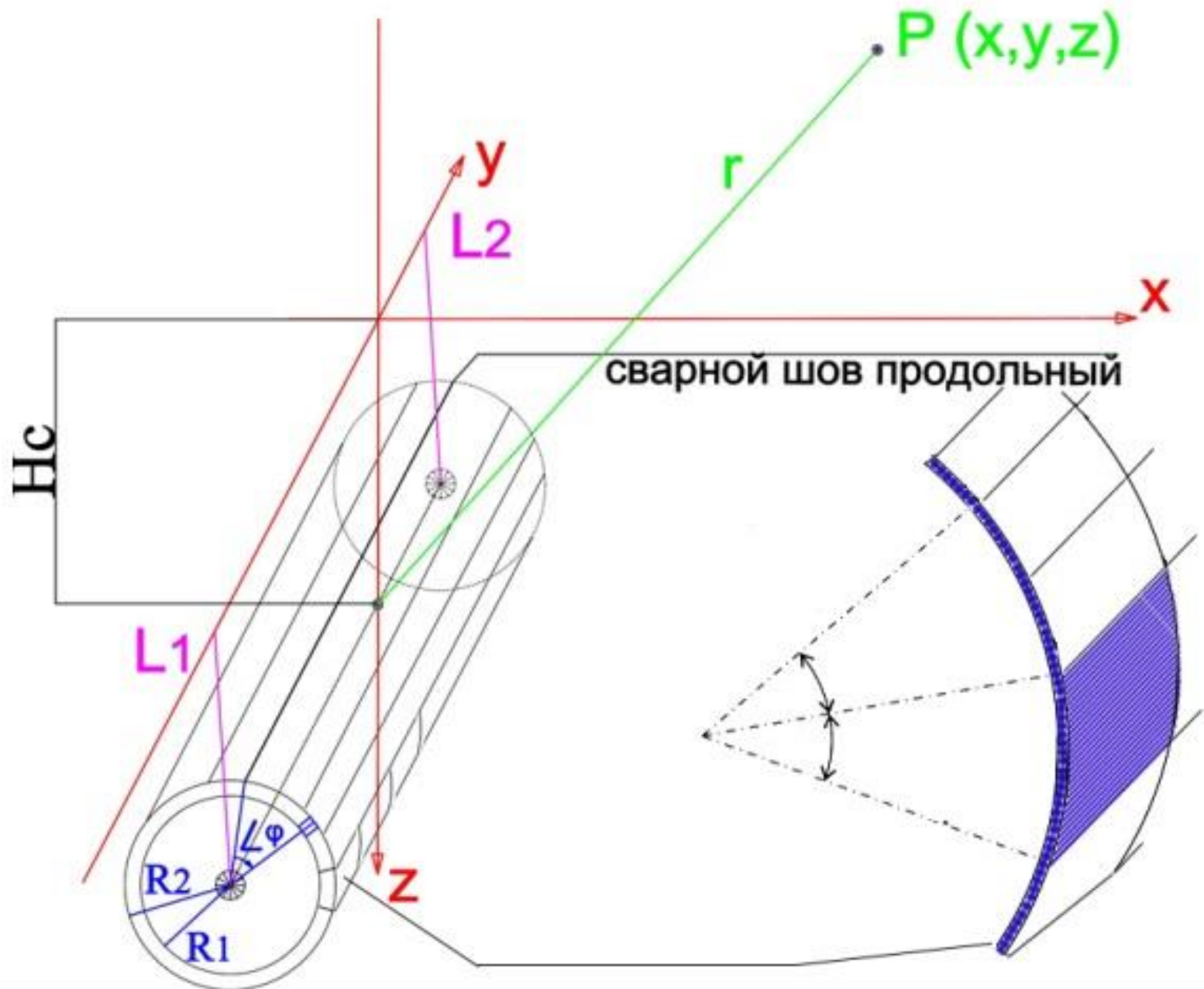


ϕ – магнитная широта точки расположения объекта; A – магнитный азимут простирания трубы; $J_{ind_{x,y,z}}$ – компоненты вектора индуктивного намагничивания; $B_{x,y,z}$ – компоненты вектора нормального поля Земли; χ – магнитная восприимчивость материала трубы; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Анализ экспериментальных данных для образцов материала трубы показывают, что прямошовная стальная труба, по своим магнитным свойствам, является достаточно сложным трёхмерным объектом.

В качестве базового аппроксимирующего элемента модели возьмём тонкий горизонтальный ограниченный по простиранию цилиндр с произвольным направлением вектора намагничения.

Аналитические выражения компонент индукции магнитного поля от этого объекта можно вычислить интегрированием компонент индукции поля произвольно намагниченного магнитного диполя по одной из осей координат.



Переменные (x, y, z) относятся к точке вычисления поля, а переменные (ξ, ζ) – к точке пространственного положения источника по осям X и Z соответственно.

Координаты $L1$ и $L2$ ($L1 < L2$) обозначают положение краевых точек тонкого цилиндра по оси Y . Величина r выражает расстояние между центром цилиндра и точкой вычисления поля в плоскости XOZ

$$r = [(x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2}.$$

$$J_{x,y,z} = Jrem_{x,y,z} + Jind_{x,y,z} = Jrem_{x,y,z} + \chi \frac{B_{x,y,z}}{\mu_0}$$

$J_{x,y,z}$ – компоненты вектора намагничения; $Jrem_{x,y,z}$ – компоненты вектора остаточного намагничения; $Jind_{x,y,z}$ – компоненты вектора индуктивного намагничения; $B_{x,y,z}$ – компоненты вектора нормального поля Земли; χ – магнитная восприимчивость материала трубы; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Выражения для компонент индукции
магнитного поля, обусловленного полным
модельным объектом (трубой)

$$B_X(x, y) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} dB_X(x, y, 0) \cdot r dr d\varphi,$$

$$B_Y(x, y) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} dB_Y(x, y, 0) \cdot r dr d\varphi,$$

$$B_Z(x, y) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} dB_Z(x, y, 0) \cdot r dr d\varphi,$$

$dB_{X,Y,Z}$ компоненты индукции магнитного поля,
произвольно намагниченного магнитного диполя;
 dr и $d\varphi$ цилиндрические координаты по радиусу и углу
в системе координат источника

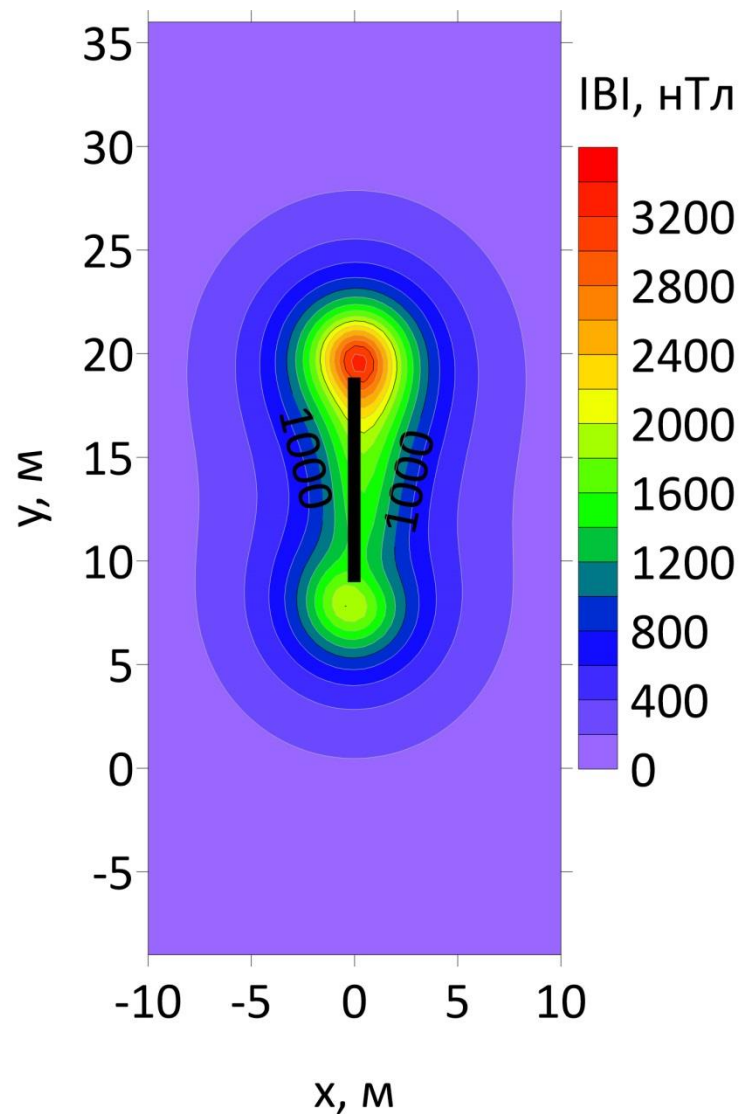
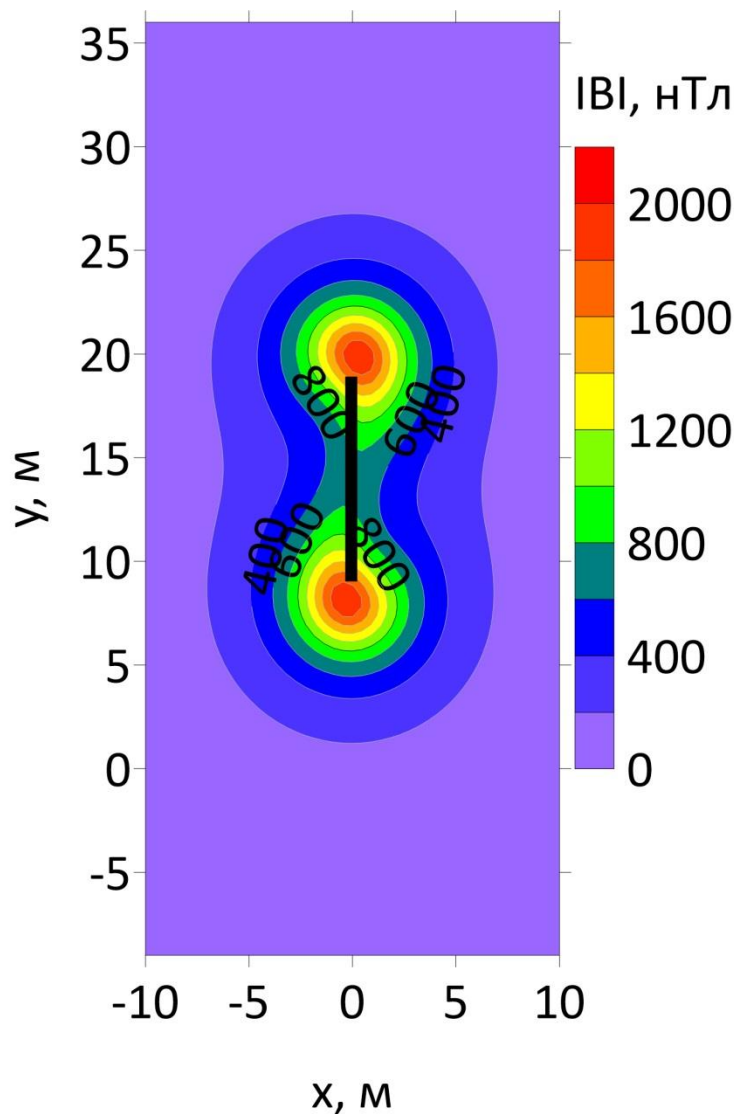
Выражения компонент индукции магнитного поля от
элементарного аппроксимационного объекта
(горизонтальный ограниченный по простиранию цилиндр)

$$dB_X(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} dS \left\{ \frac{(x-\xi)^2 J_x - (x-\xi)(z-\zeta) J_z}{r^4} \left[\frac{(y-L_2)^3}{[r^2+(y-L_2)^2]^{3/2}} - \frac{(y-L_1)^3}{[r^2+(y-L_1)^2]^{3/2}} \right] + \frac{3(x-\xi)(z-\zeta) J_z + [(z-\zeta)^2 - 2(x-\xi)^2] J_x}{r^4} \left[\frac{(y-L_2)}{[r^2+(y-L_2)^2]^{1/2}} - \frac{(y-L_1)}{[r^2+(y-L_1)^2]^{1/2}} \right] + (x-\xi) J_y \left[\frac{1}{[r^2+(y-L_2)^2]^{3/2}} - \frac{1}{[r^2+(y-L_1)^2]^{3/2}} \right] \right\},$$

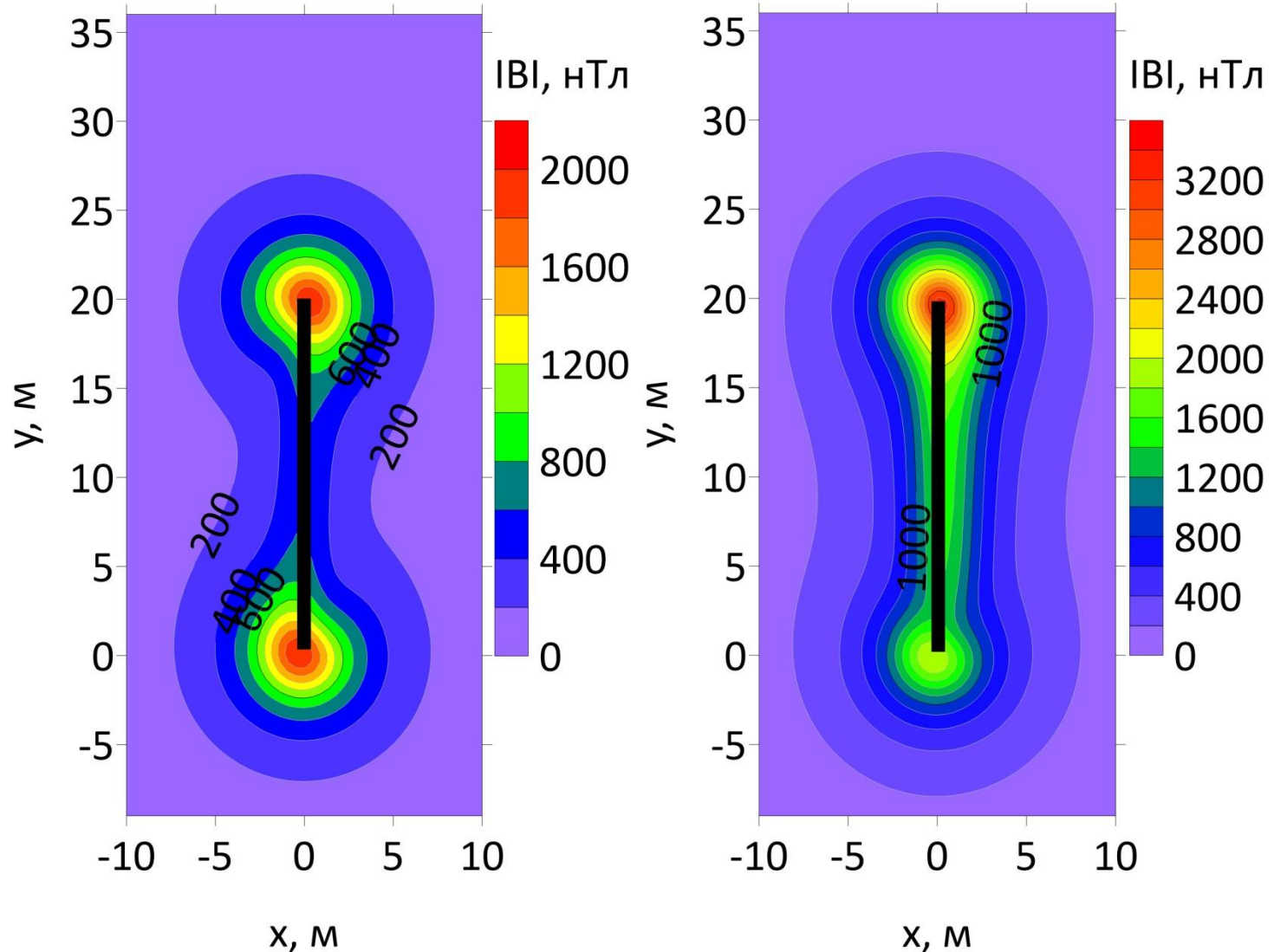
$$dB_Y(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} dS \left\{ [(x-\xi) J_x - (z-\zeta) J_z] \left[\frac{1}{[r^2+(y-L_2)^2]^{3/2}} - \frac{1}{[r^2+(y-L_1)^2]^{3/2}} \right] + \frac{J_y}{r^2} \left[\frac{(y-L_2)^3}{[r^2+(y-L_2)^2]^{3/2}} - \frac{(y-L_1)^3}{[r^2+(y-L_1)^2]^{3/2}} \right] + \frac{J_y}{r^2} \left[\frac{(y-L_2)}{[r^2+(y-L_2)^2]^{1/2}} - \frac{(y-L_1)}{[r^2+(y-L_1)^2]^{1/2}} \right] \right\},$$

$$dB_Z(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} dS \left\{ \frac{(z-\zeta)^2 J_z - (x-\xi)(z-\zeta) J_x}{r^4} \left[\frac{(y-L_2)^3}{[r^2+(y-L_2)^2]^{3/2}} - \frac{(y-L_1)^3}{[r^2+(y-L_1)^2]^{3/2}} \right] + \frac{3(x-\xi)(z-\zeta) J_x + [(x-\xi)^2 - 2(z-\zeta)^2] J_z}{r^4} \left[\frac{(y-L_2)}{[r^2+(y-L_2)^2]^{1/2}} - \frac{(y-L_1)}{[r^2+(y-L_1)^2]^{1/2}} \right] + (z-\zeta) J_y \left[\frac{1}{[r^2+(y-L_2)^2]^{3/2}} - \frac{1}{[r^2+(y-L_1)^2]^{3/2}} \right] \right\}.$$

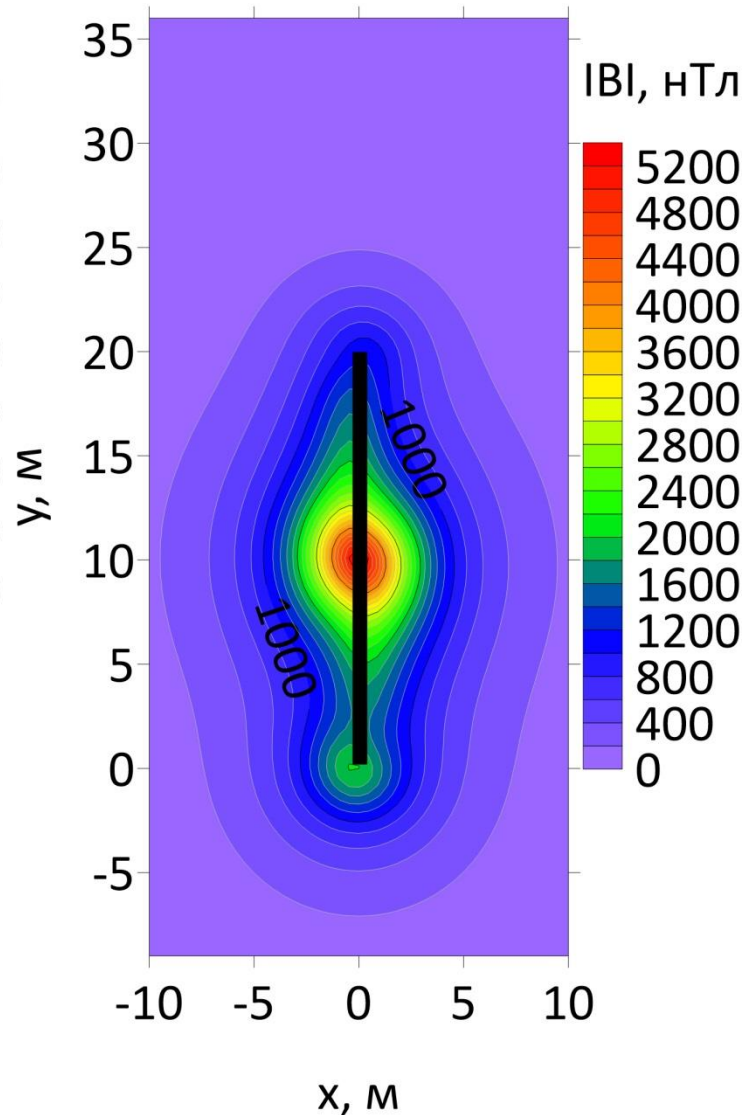
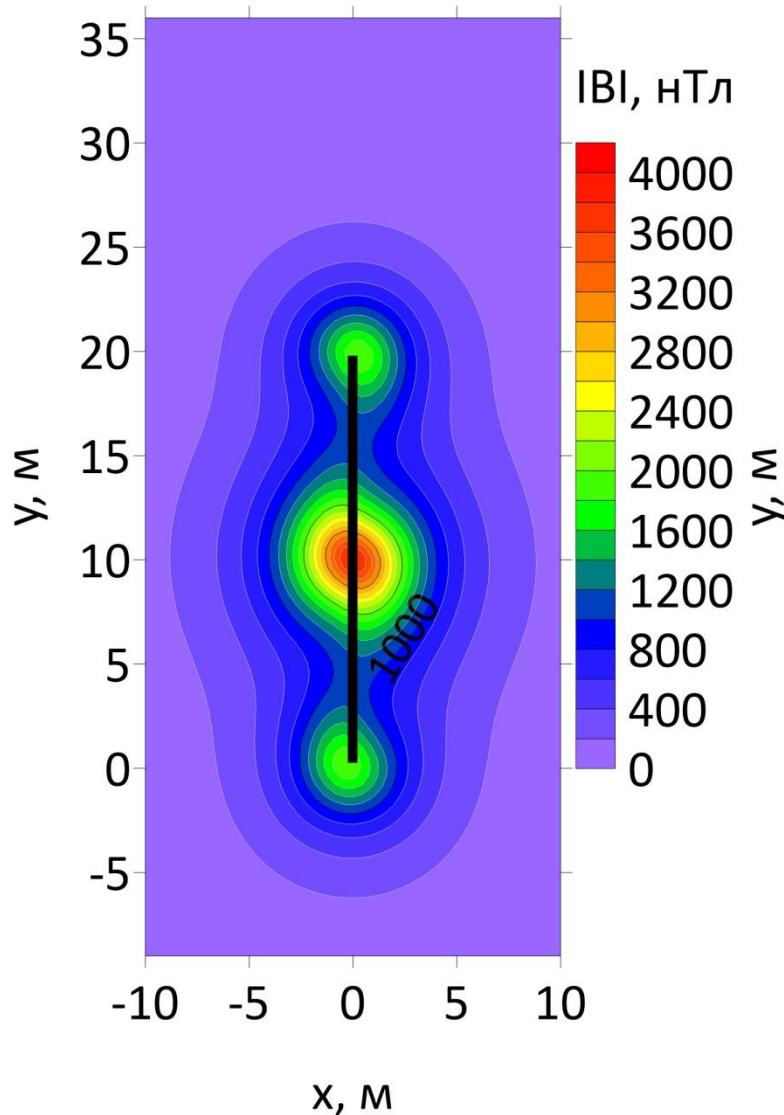
Карта модуля вектора индукции магнитного поля, обусловленного одним элементом - прямошовной трубой



Карта модуля вектора индукции магнитного поля, обусловленного двумя элементами – двумя прямошовными трубами (однонаправленность компонент векторов остаточного намагничивания)



Карта модуля вектора индукции магнитного поля, обусловленного двумя элементами – двумя прямошовными трубами (антипараллельность компонент векторов остаточного намагничивания)



Результаты исследований:

1. Магнитная восприимчивость может варьировать по длине и периметру трубы в больших пределах, то есть значительно влияет на величину намагниченности объекта и его внешнее магнитное поле.
2. Прямые измерения магнитных свойств материала прямошовной стальной трубы демонстрируют, что модуль вектора остаточной намагниченности примерно в три-четыре раза превышает значения модуля вектора индуктивного намагничения;
3. Полный вектор остаточной намагниченности всего изделия, лежит практически в плоскости стального листа, представляющего заготовку будущей трубы;

Результаты исследований:

4. Предложена аппроксимационная модель источника внешнего поля, наиболее отвечающая реальной геометрии изделия – прямошовной стальной трубы;
5. Предложенный подход вычисления компонент индукции и модуля вектора магнитного поля для трубного элемента, позволяет рассчитывать внешние поля отдельного изделия, а также моделировать различные сочетания полей от нескольких трубных элементов представляющих модель стального трубопровода.
6. Расчёты магнитного поля модельного объекта, содержащего отдельный элемент трубы или его составные модели части в различных сочетаниях, демонстрируют хорошую тождественность реальным наблюдаемым полям над трубопроводами;

Результаты исследований:

7. Индуктивная намагниченность является значимой величиной при расчёте внешнего магнитного поля от стальной прямошовной трубы и должна обязательно учитываться;

8. Предложенные методы расчёта компонент индукции внешнего магнитного поля, основанные на аппроксимационном подходе и опирающиеся на выявленные соотношения для компонент вектора остаточного и индуктивного намагничения трубы, следует использовать при интерпретации практических материалов над трубопроводами.

**Авторы выражают благодарность за поддержку
данных исследований:**

**Я.В. Латарцеву Генеральному директору
АО ППТР «ПЁТР»**

и

Руководству ООО «АльянсСтройКомплект»

Благодарю за внимание.

