

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НИЖНЕГО КРИТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НЕУПОРЯДОЧЕННОМ $S-I-S$ КОНТАКТЕ

Н.В. Кирпиченкова, К.В. Крыжановский, М.Б. Зиненко

Южно-Российский государственный политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова
wkirpich@rambler.ru

На плоскости параметров (безразмерная концентрация примеси, энергия однопримесного электронного уровня) при различных температурах найдены области, внутри которых нижнее критическое поле неупорядоченного контакта превышает нижнее критическое поле чистого контакта и показано, что с ростом температуры контакта эти области сужаются.

Ключевые слова: джозефсоновский контакт, нижнее критическое поле, джозефсоновский вихрь, неупорядоченный контакт, квантовые резонансно-перколяционные траектории, уравнение *sin-Gordon*.

Если напряженность внешнего магнитного поля H , параллельного плоскости джозефсоновского $S-I-S$ (S – сверхпроводник, I – изолятор) контакта, превышает некоторое критическое значение H_c , называемое термодинамическим нижним критическим полем джозефсоновского контакта, то в контакте появляются джозефсоновские вихри. Безвихревое состояние контакта, имеющее место при $H < H_c$, при $H > H_c$ становится неустойчивым, поскольку состояние контакта с джозефсоновским вихрем оказывается энергетически более выгодным, чем безвихревое [1, 2].

В чистом $S-I-S$ контакте формула для нижнего критического поля имеет следующий вид [1]:

$$H_{c0} = \frac{1}{\Phi_0} F[\varphi_0],$$

где:

$$F[\varphi_0] = C \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi_0}{dx} \right)^2 + \lambda_J^{-2} (1 - \cos \varphi_0) \right] dx -$$

функционал свободной энергии чистого $S-I-S$ контакта с одним джозефсоновским вихрем,

$$\varphi_0(x) = 4 \operatorname{arctg} \left(e^{kx} \right) -$$

солитонное решение для уединенного джозефсоновского вихря в чистом $S-I-S$ контакте, $k = \lambda_J^{-1}$, λ_J – джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля в чистый $S-I-S$ контакт, $\Phi_0 = \pi \hbar / e$ – квант магнитного потока, C – некоторая константа, одинаковая для случаев чистого и неупорядоченного $S-I-S$ контактов.

В неупорядоченном (с примесями в I -слое) S - I - S контакте формула для нижнего критического поля имеет вид [3, 4]:

$$\langle H_c \rangle = \frac{1}{\Phi_0} F[\langle \varphi \rangle],$$

где:

$$F[\langle \varphi \rangle] = C \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{d\langle \varphi \rangle}{dx} \right)^2 + \langle \lambda_J^{-2} \rangle (1 - \cos \langle \varphi \rangle) \right] dx -$$

функционал свободной энергии неупорядоченного S - I - S контакта с одним джозефсоновским вихрем,

$$\langle \varphi \rangle = \langle \varphi(x, T) \rangle -$$

усредненное по ансамблю примесей $\{\Gamma_N\}$ решение стохастически возмущенного стационарного уравнения *sin-Gordon*.

На основе специализированного программного комплекса "NISPSE SIN-GORDON" [5] проведено численное исследование совместного влияния случайных КРПТ в неупорядоченном S - I - S контакте и ненулевых температур $0 \leq T < T_c$ на нижнее критическое поле неупорядоченного S - I - S контакта.

Для этого над плоскостью (c, ε_0) (c – безразмерная концентрация примеси, ε_0 – энергия однопримесного электронного уровня) построены поверхности безразмерного критического поля неупорядоченного S - I - S контакта

$$\langle h_c(c, \varepsilon_0, T) \rangle = \frac{\langle H_c(c, \varepsilon_0, T) \rangle}{H_{c0}(T=0)},$$

где в качестве единицы измерения принято нижнее критическое поле $H_{c0}(T=0)$ соответствующего чистого ($c=0$) S - I - S контакта при температуре $T=0$. Поверхности $\langle h_c(c, \varepsilon_0, T) \rangle$ и соответствующие им линии уровня построены для температур: $T_1=0$, $T_2=0,2T_c$, $T_3=0,4T_c$, $T_4=0,6T_c$, $T_5=0,8T_c$, $T_6=0,9T_c$; электронный химпотенциал контакта $\mu=5$ эВ.

Заметим, что эти поверхности в пространстве параметров (c, ε_0, T) разделяют безвихревые состояния неупорядоченного S - I - S контакта (под поверхностью) от состояний в одном или более джозефсоновским вихрем (над поверхностью).

На рис. 1 – 12 построены поверхности безразмерного критического поля $\langle h_c(c, \varepsilon_0, T) \rangle$ и для большей информативности – соответствующие им линии уровня для упомянутых выше шести температур. Из этих рисунков видно, что: 1. На поверхностях $\langle h_c(c, \varepsilon_0, T) \rangle$ при всех рассмотренных температурах явно выражены два максимума, обусловленные вкладами однопримесных (более высокий максимум) и двухпримесных квантовых резонансно-перколяционных траекторий (КРПТ) [6].

2. При температуре $T_1 = 0$ максимальное значение $\langle h_c \rangle_{\max} = 6$, а при $T_6 = 0,9T_c$ $\langle h_c \rangle_{\max} = 2,5$, т.е. влияние КРПТ на нижнее критическое значение магнитного поля неупорядоченного $S-I-S$ контакта уменьшается с ростом температуры контакта, оставаясь, тем не менее, весьма существенным при всех исследованных температурах.
3. В интервале температур $0 \leq T \leq 0,4T_c$ нижнее критическое магнитное поле $\langle h_c \rangle$ слабо изменяется с ростом температуры – зона «слабой чувствительности».
4. Линии уровня $\langle h_c \rangle = 1$ отделяют на плоскости параметров (c, ε_0) область существенного влияния КРПТ на нижнее критическое магнитное поле неупорядоченного $S-I-S$ контакта от области, где это влияние отсутствует.
5. С ростом температуры область существенного влияния КРПТ на нижнее критическое магнитное поле неупорядоченного $S-I-S$ контакта сужается.

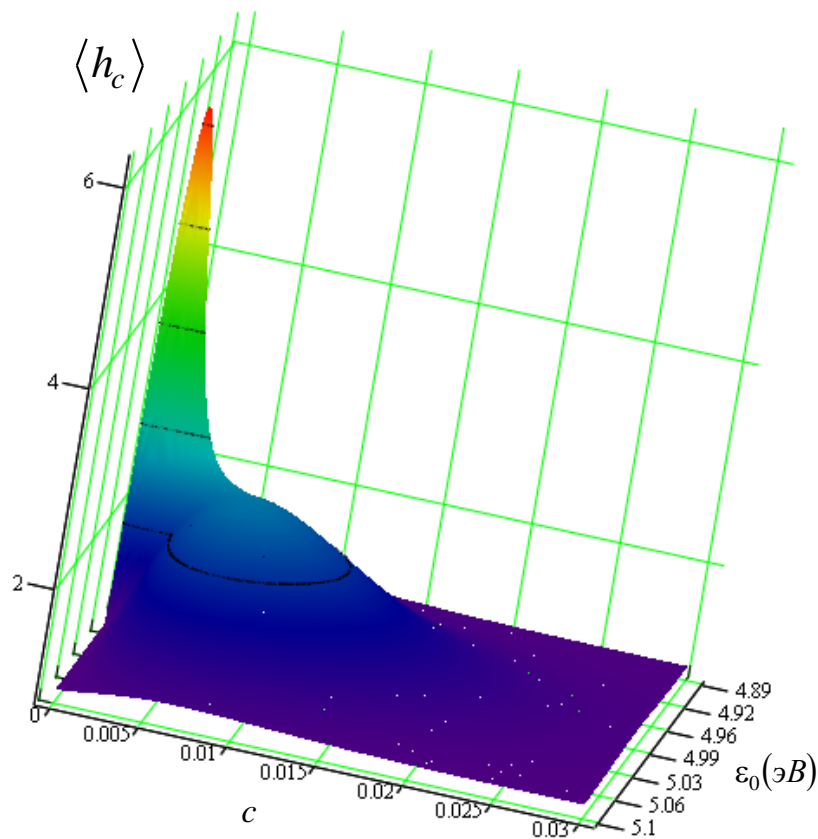


Рисунок 1 – Безразмерное нижнее критическое поле $\langle h_c(c, \varepsilon_0, T_1) \rangle$ неупорядоченного $S-I-S$ контакта при $T_1 = 0$

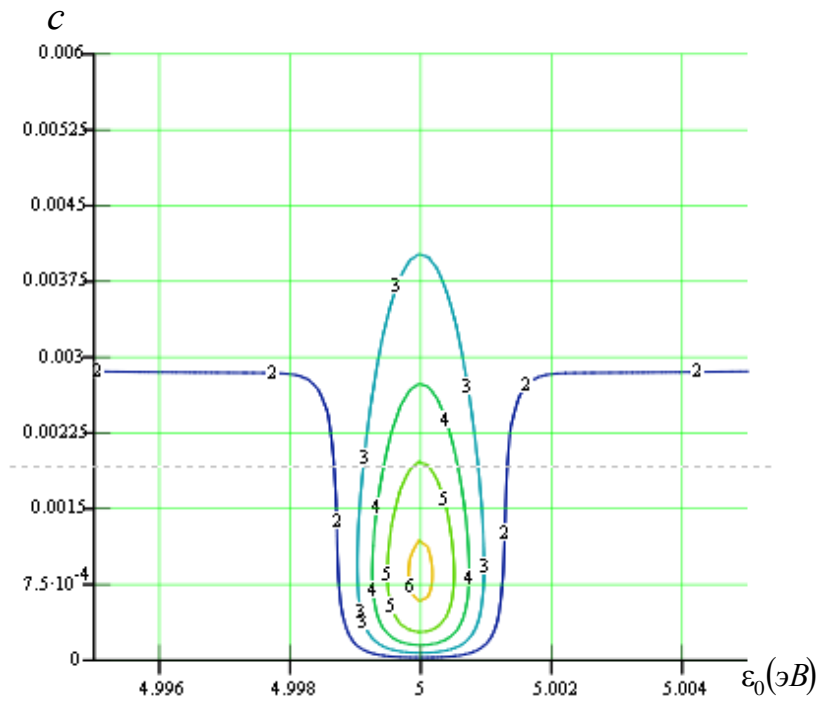


Рисунок 2 – Линии уровня функции $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_1) \rangle$ при $T_1 = 0$

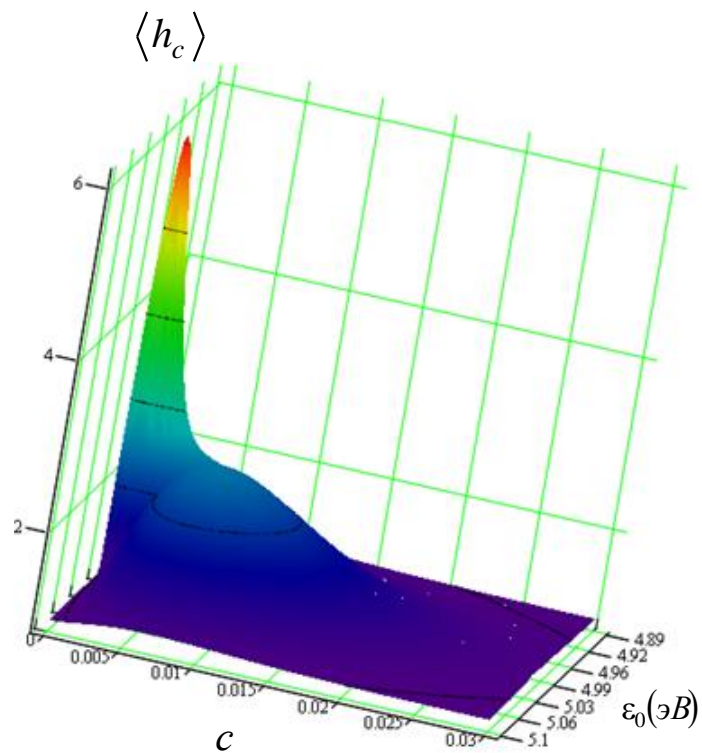


Рисунок 3 – Безразмерное нижнее критическое поле $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_2) \rangle$ неупорядоченного S-I-S контакта при $T_2 = 0, 2T_c$

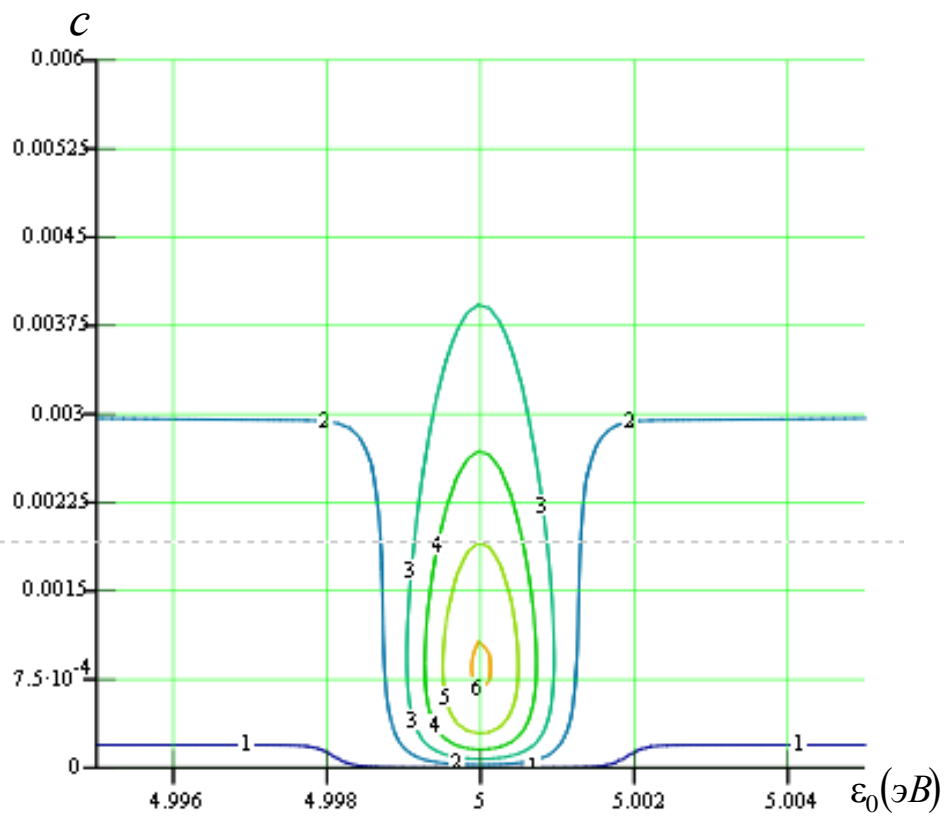


Рисунок 4 – Линии уровня функции $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_2) \rangle$ при $T_2 = 0,2T_c$

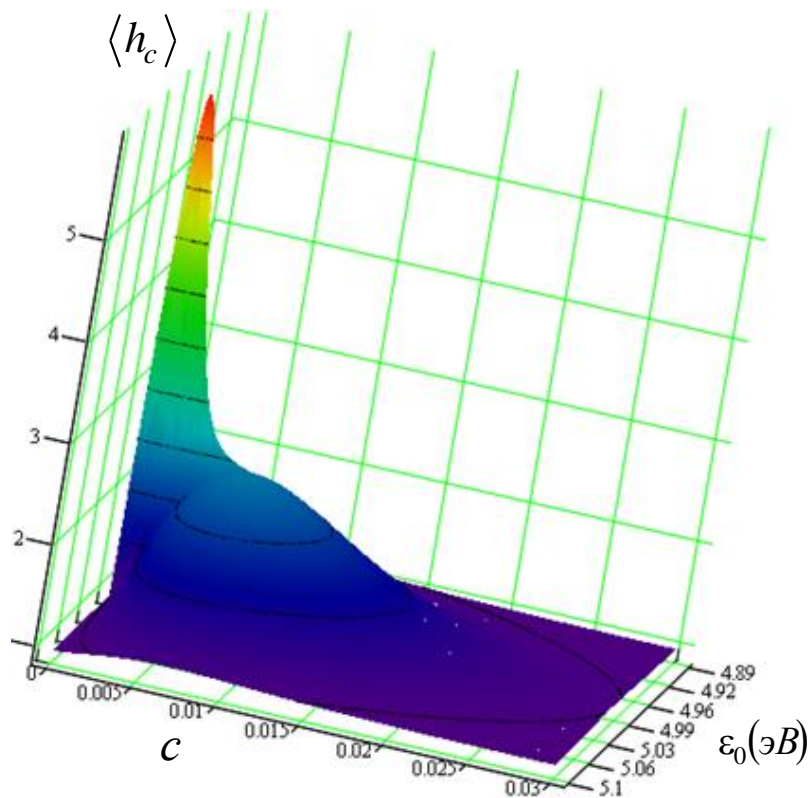


Рисунок 5 – Безразмерное нижнее критическое поле $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_3) \rangle$ неупорядоченного $S-I-S$ контакта при $T_3 = 0,4T_c$

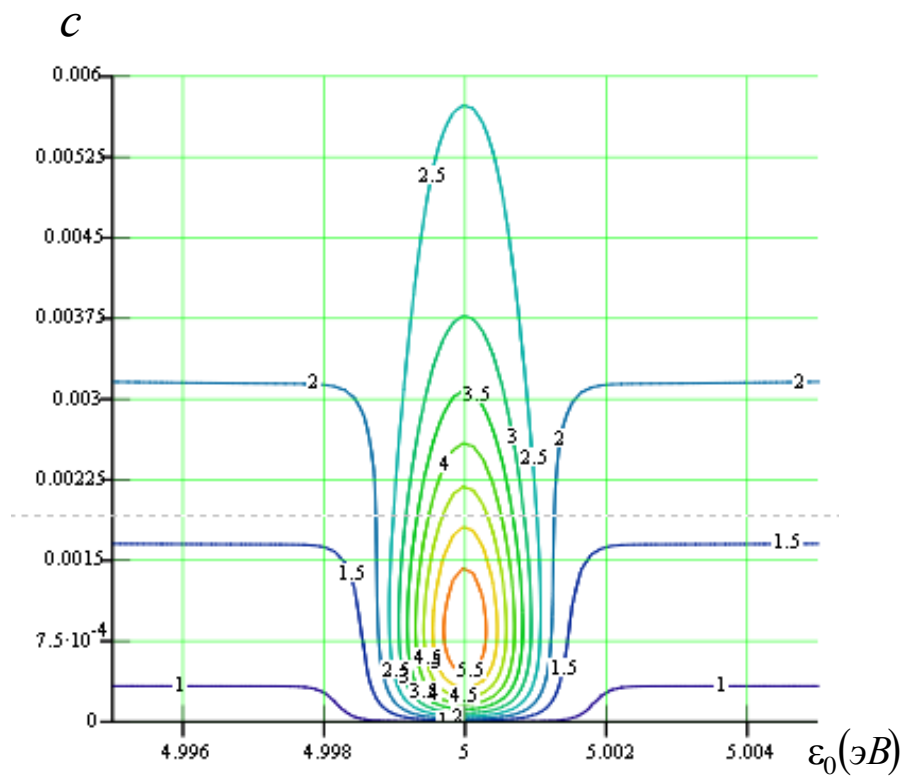


Рисунок 6 – Линии уровня функции $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_3) \rangle$ при $T_3 = 0,4T_c$

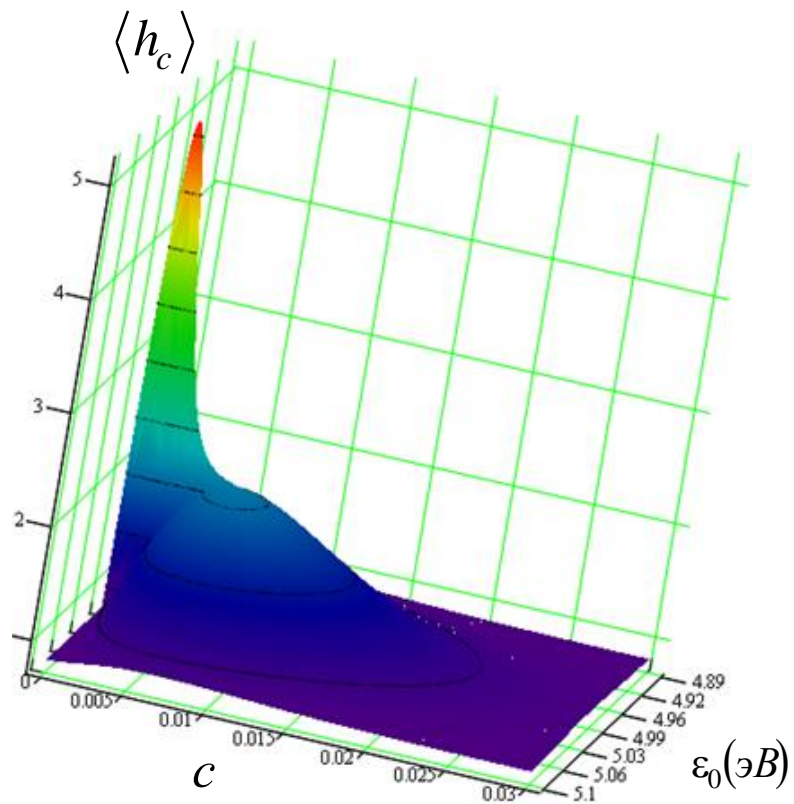


Рисунок 7 – Безразмерное нижнее критическое поле $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_4) \rangle$ неупорядоченного $S-I-S$ контакта при $T_4 = 0,6T_c$

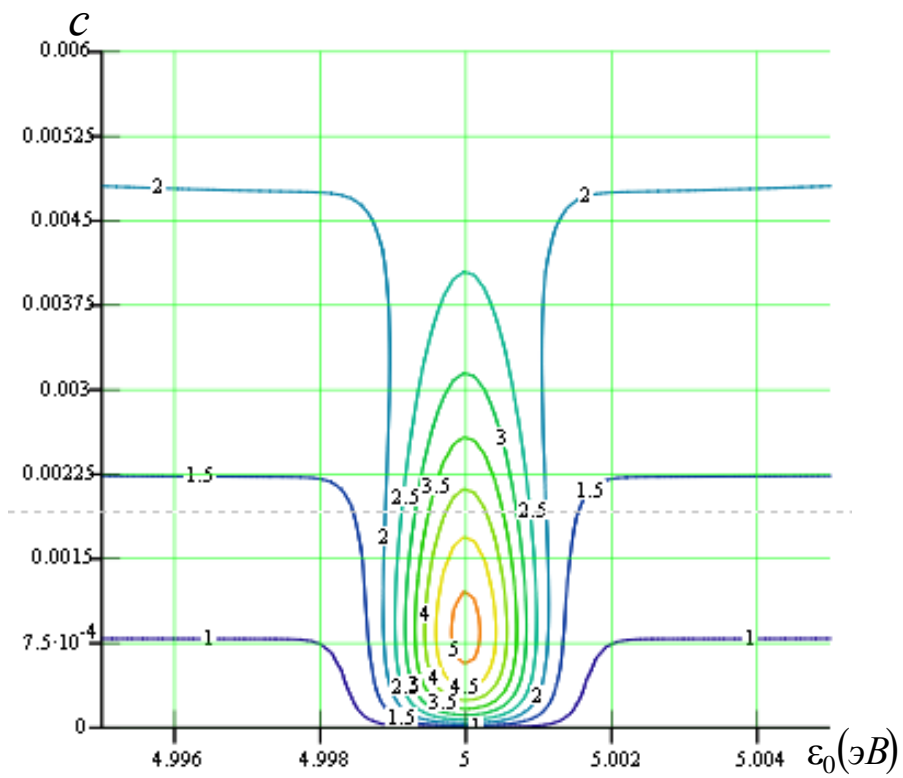


Рисунок 8 – Линии уровня функции $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_4) \rangle$ при $T_4 = 0,6T_c$

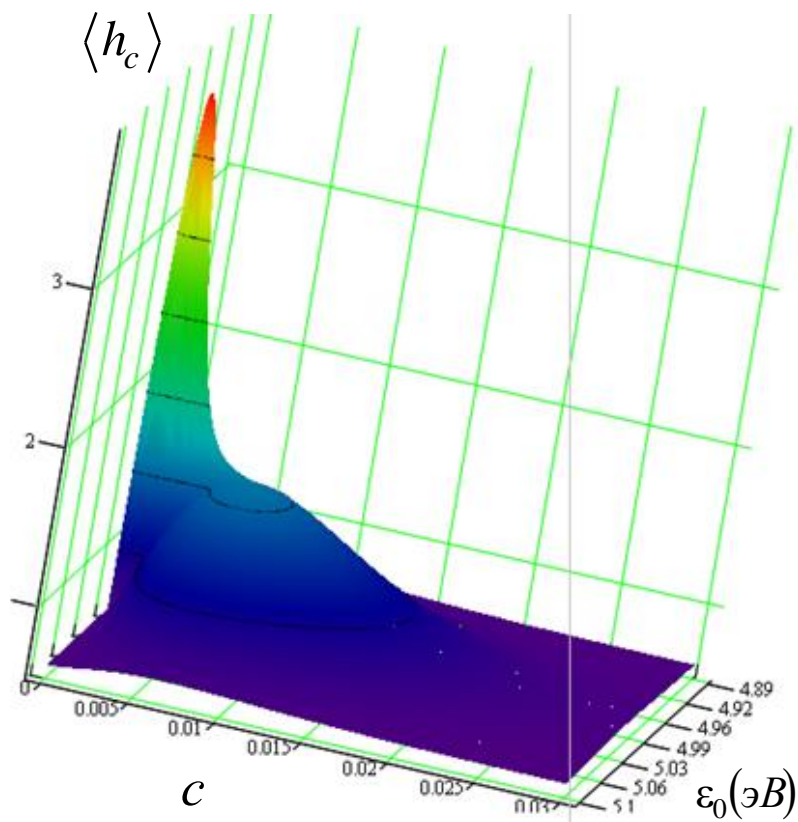


Рисунок 9 – Безразмерное нижнее критическое поле $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_5) \rangle$ неупорядоченного S-I-S контакта при $T_5 = 0,8T_c$

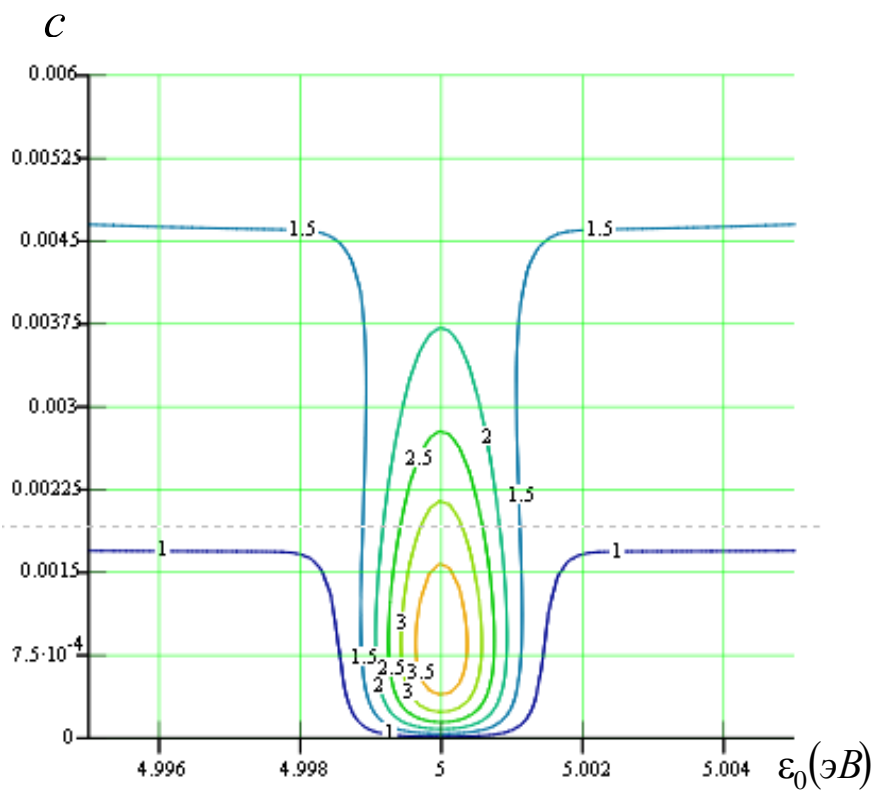


Рисунок 10 – Линии уровня функции $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_5) \rangle$ при $T_5 = 0,8T_c$

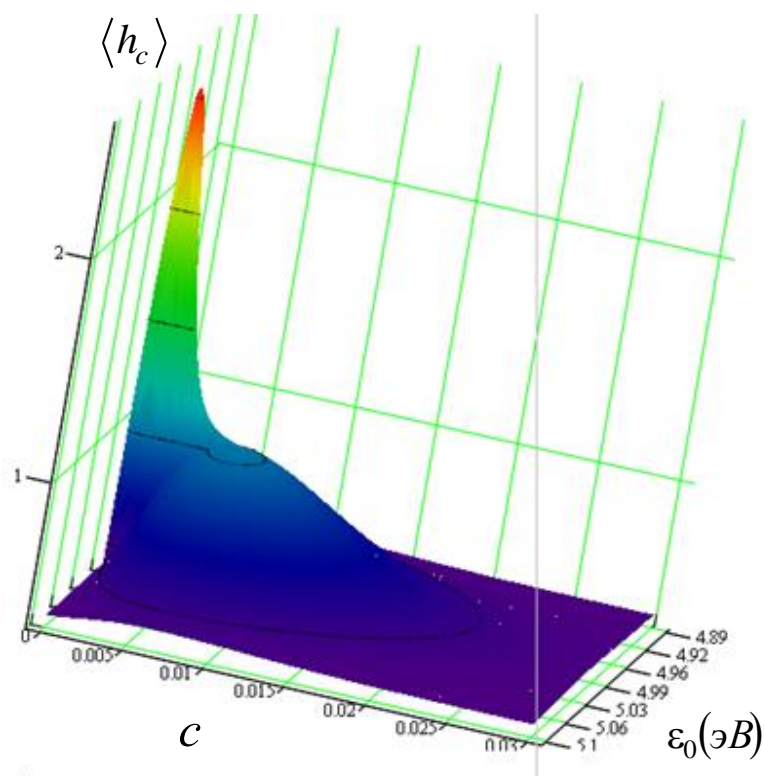


Рисунок 11 – Безразмерное нижнее критическое поле $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_6) \rangle$ неупорядоченного $S-I-S$ контакта при $T_6 = 0,9T_c$

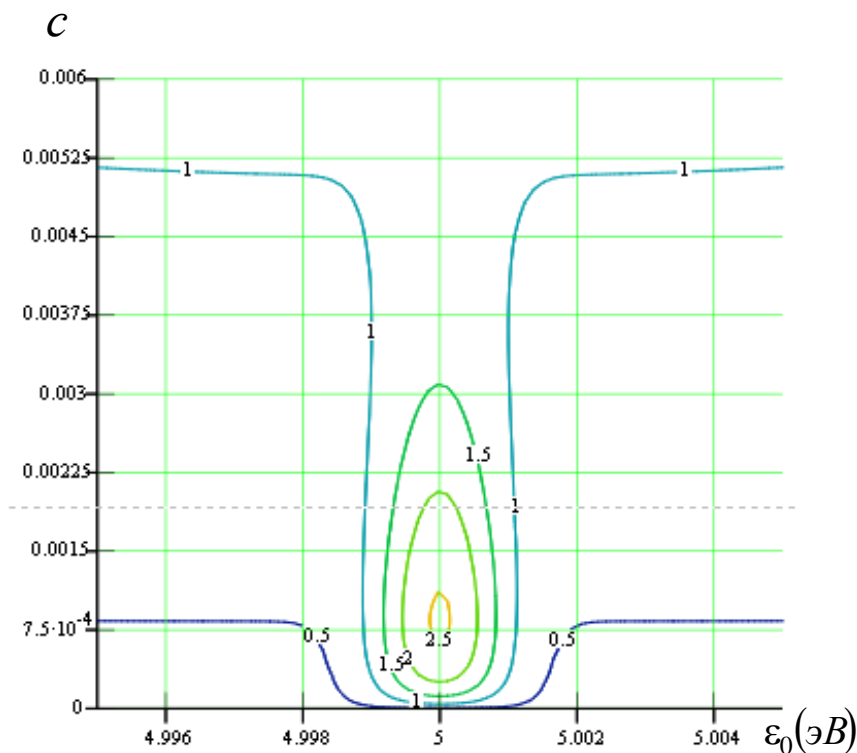


Рисунок 12 – Линии уровня функции $\langle h_c(c, \epsilon_0, T_6) \rangle$ при $T_6 = 0,9T_c$

Литература

1. Бароне, А. Эффект Джозефсона. Физика и применение / А. Бароне, Дж. Патерно. – М.: Мир, 1984. – 639 с.
2. Кулик, И.О. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах / И.О. Кулик, И.К. Янсон. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
3. Kirpichenkov, V.Ya. Effect of Quantum Resonance–Percolation Trajectories on the Parameters of a Josephson Vortex / V.Ya. Kirpichenkov // JETP. – 2007. – Vol. 105, N.1. – P. 259 – 261.
4. Кирпиченков, В.Я. Теория стохастического туннелирования в неупорядоченных наноструктурах / В.Я. Кирпиченков. – М.: "Экономическое образование", 2006. – 193 с.
5. NISPSE SIN-GORDON / К.В. Крыжановский, Н.В. Кирпиченкова, В.Я. Кирпиченкова – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019615672 "NISPSE SIN-GORDON"; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 06.05.2019 г.
6. Лифшиц, И.М. О туннельной прозрачности неупорядоченных систем. / И.М. Лифшиц, В.Я. Кирпиченков // ЖЭТФ. – 1979. – Т.77. – С.989–1016.

NUMERICAL STUDY OF THE LOWER CRITICAL FIELD IN A DISORDERED S-I-S CONTACT

N.V. Kirpichenkova, K.V. Kryzhanovskii, M.B. Zinenko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

On the parameter plane (dimensionless impurity concentration, energy of a single-impurity electronic level) at different temperatures, regions are found, within which the lower critical field of a disordered contact exceeds the lower critical field of a pure contact, and it is shown that these regions narrow with increasing contact temperature.

Keywords: Josephson junction, lower critical field, Josephson vortex, disordered junction, quantum resonant-percolation trajectories, *sin-Gordon* equation