

УДК 537.84+621.365.5

Н. В. Никифорова, С. И. Павлов, А. Т. Якович

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА
СЕКЦИЙ ХОЛОДНОГО ТИГЛЯ И ЧАСТОТЫ ТОКА
ИНДУКТОРА НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ
В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

Латвийский государственный университет им. П. Стучки

В [1] предложены математические модели и методики численного расчета электромагнитного (ЭМ) поля в меридиональном сечении индукционной печи с разрезным проводящим холодным тиглем (ИПХТ-М), приведены некоторые результаты расчетов перераспределения токов в секциях холодного тигля, полученные конечно-разностным методом и методом взаимосвязанных контуров. В настоящей работе, являющейся продолжением [1], вихревые токи и объемные ЭМ силы исследуются в зависимости от частоты возбуждающего поля, создаваемого индуктором, и от числа секций холодного тигля. Применяются идеализированная и «реальная» модели холодного тигля (соответственно без учета и с учетом сопротивления боковых граней [1]). Приводится сравнение с результатами для индукционной тигельной печи (ИТП). Результаты представляемых расчетов использовались в качестве исходных данных для исследования гидродинамики расплава ИПХТ-М [2].

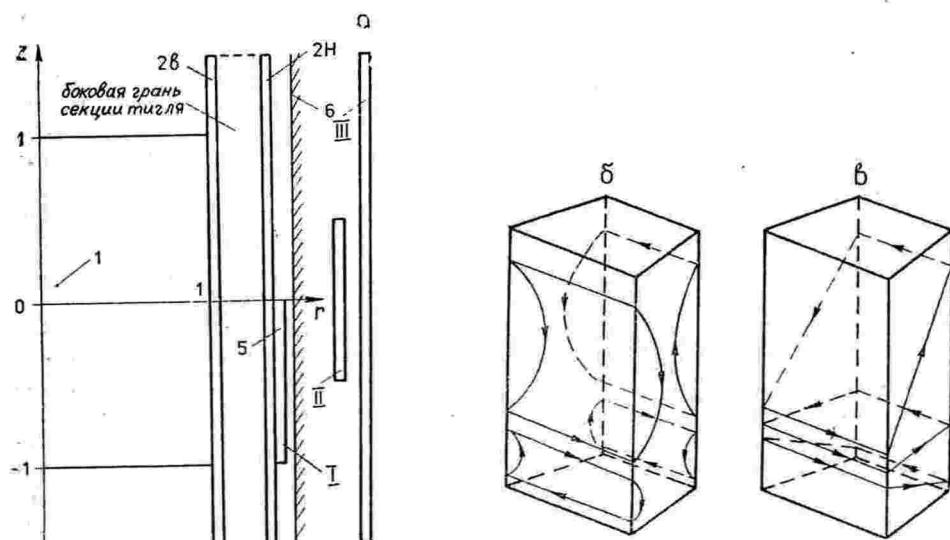


Рис. 1. Схема меридионального сечения расчетных моделей ИПХТ-М (а): 1 — расплав; 2 — холодный тигель (наружный «н» и внутренний «в» слои); 5 — индуктор (I, II, III — различные индукторы; при расчетах вместо индуктора I с сохранением его расположения в радиальном направлении размещаются индукторы II, III), 6 — идеальный магнитный экран (сохранена принятая в [1] нумерация подобластей). Схема замыкания тока в пределах секции холодного тигля (невидимые грани обращены к расплаву) при $f_q = 10$; 250 Гц (б, б')

Расчетные модели. Для расчетов выбрана модель (рис. 1, а) со следующими геометрическими параметрами: высота расплава $h_p=2r_0$; высота холодного тигля, расположенного симметрично относительно средней плоскости расплава, $h_t=3r_0$; высота индуктора (рис. 1, а, положение I — нижний торец находится на уровне нижнего торца расплава) $h_i=r_0$; внутренний радиус индуктора $r_i=1,3 r_0$. Радиус расплава в расчетах при частотах тока в индукторе $f_q=10; 50; 250$ Гц (рис. 1, б, в; 2, 3, 5) $r_0=0,15$ м, при $f_q=2400$ Гц (рис. 4) $r_0=0,1$ м. Другая высота ($h_i=3 r_0$, рис. 1, а положение III) и расположение (симметричное относительно средней плоскости расплава — рис. 1, а, положения II, III) индуктора рассматривались в расчетах при $f_q=2400$ Гц (рис. 4).

Частотам тока в индукторе $f_q=10; 50; 250$ Гц соответствуют значения безразмерной частоты расплава $\hat{\omega}_p=1,8; 8,9; 44,5$ и холодного тигля $\hat{\omega}_t=90; 445; 2225$ ($r_0=0,15$ м). При $f_q=2400$ Гц — $\hat{\omega}_p=140; \hat{\omega}_t^B=4535; \hat{\omega}_t^H=9475$ ($r_0=0,1$ м) — учтено различие безразмерных частот во внутреннем $\hat{\omega}_t^B$ и наружном $\hat{\omega}_t^H$ слоях холодного из-за температурной зависимости электропроводности материала тигля [1]. Значения безразмерной частоты вычисляются по формуле

$$\hat{\omega} = \mu_0 \sigma \omega r_0^2, \quad (1)$$

где σ — электропроводность, ω — круговая частота.

При $f_q=10; 50; 250$ Гц характерная плотность тока (в индукторе) $j_0=7,3$ МА/м², характерная плотность ЭМ силы $f_0=0,68$ МН/м³; при $f_q=2400$ Гц $j_0=1,95$ МА/м².

Расчеты с использованием «реальной» модели боковой грани секции холодного тигля проводились при $f_q=50$ Гц (рис. 5) с различным числом секций — $m_c=2; 4; 8; 16$, которым соответствуют значения безразмерного параметра $K=13,5; 27; 54; 108$. Параметр K определяется соотношением [1]

$$K=\sqrt{2} m_c r_0 / \pi d_b. \quad (2)$$

Максимальное число секций холодного тигля $m_c=16$ выбиралось с учетом условия $r_0 \Delta \alpha_c \gg d_b$ ($\Delta \alpha_c$ — угловой размер секции тигля), толщина токового слоя на боковой грани d_b принималась $\approx 0,01$ м.

Параметры ИПХТ-М выбирались с таким расчетом, чтобы, по возможности, ярче проявились особенности перераспределения токов, вносимые холодным тиглем, по сравнению с обычной ИТП с керамическим тиглем.

Результаты расчетов. Влияние частоты тока в индукторе на процессы, происходящие в системе «индуктор—холодный тигель—расплав», изучалось в приближении идеализированного холодного тигля [1] при значениях частоты тока в индукторе $f_q=10; 50; 250$ Гц. Толщины внутренней и наружной стенок холодного тигля выбраны равными $d_v=d_h=0,01$ м. Глубины проникновения тока в материал тигля для выбранных частот ЭМ поля соответственно равны $\delta_t=0,05; 0,022; 0,01$ м. Таким образом, при $f_q=10$ Гц холодный тигель практически прозрачен для ЭМ поля, и индуцированные в расплаве токи в основном определяются непосредственным влиянием токов индуктора. При $f_q=50$ Гц холодный тигель частично прозрачен для ЭМ поля, и на распределение тока в расплаве оказывают влияние и ток индуктора, и ток, индуцированный в холодном тигле. При $f_q=250$ Гц ток в расплаве определяется практически только током во внутреннем слое холодного тигля.

На рис. 2, а показано распределение азимутальной составляющей плотности тока по высоте в наружном слое тигля, которое определяется в основном током индуктора, его частотой и зазором между индуктором и стенкой тигля. Плотность тока максимальна в центре индуктора,

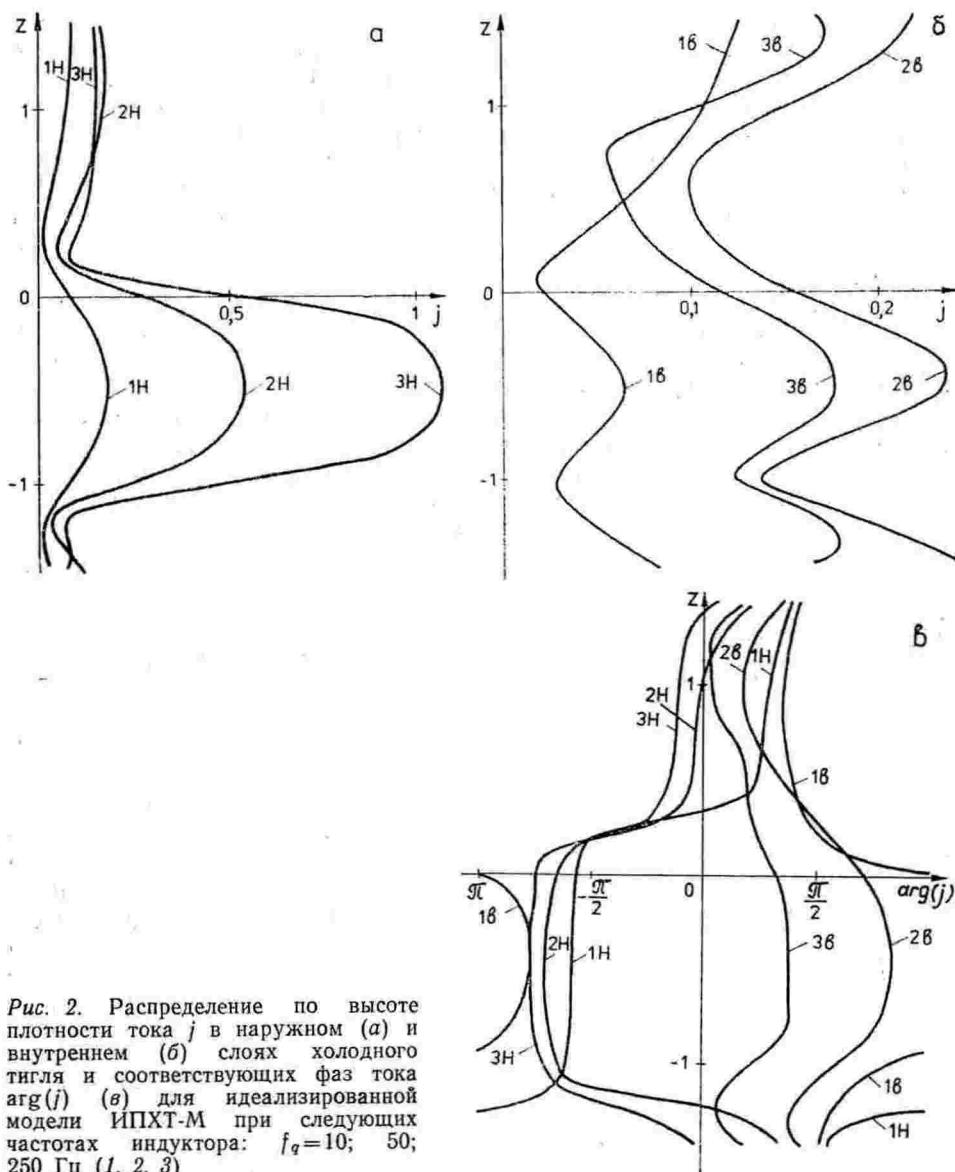


Рис. 2. Распределение по высоте плотности тока j в наружном (а) и внутреннем (б) слоях холодного тигля и соответствующих фаз тока $\arg(j)$ (в) для идеализированной модели ИПХТ-М при следующих частотах индуктора: $f_q=10; 50; 250$ Гц (1, 2, 3)

спадает к его торцам и снова возрастает при приближении к торцам холодного тигля, достигая при $f_q=10$ Гц 50% своего максимального значения. При повышении частоты ЭМ поля это явление выражено слабо. Для его объяснения необходимо рассмотреть распределение тока во внутреннем слое холодного тигля (рис. 2, б), а также фазу токов (фаза отсчитывается от фазы тока в индукторе, принимаемой за нулевую) во внутреннем и внешнем слоях тигля (рис. 2, в, кривые «в», «н»).

Рис. 2, в показывает, что разность фаз токов, текущих во внутреннем и наружном слоях холодного тигля, вне зон индуктора мала (мгновенные направления токов в торцевых зонах тигля в обоих слоях практически совпадают). Фаза этих токов сдвинута на 180° по отношению к фазе тока в наружном слое холодного тигля в зоне индуктора. Этот сдвиг фаз указывает, что в торцевых зонах тигля замыкаются токи, текущие в зоне индуктора. Картина замыкания при малых и средних

частотах ЭМ поля существенно различна. При $f_q=10$ Гц тигель прозрачен для ЭМ поля, и разность фаз токов во внутреннем и наружном слоях тигля в зоне индуктора относительно мала (минимальна в средней части индуктора — 30°), т. е. токи в боковых гранях тигля направлены в основном вертикально. Схематически замыкание токов в секции тигля при $f_q=10$ Гц для фиксированного момента времени показано на рис. 1—6. Если тигель является непрозрачным для ЭМ поля (рис. 1,б) ($f_q=250$ Гц), токи во внутреннем и наружном слоях тигля в зоне индуктора противонаправлены в любой момент времени (рис. 2,в, 3). Замыкание токов в секции показано на рис. 1,в.

Холодный тигель (рис. 1,а) имеет относительно длинные торцевые зоны, расположенные вне расплава. Сопротивление тока в боковых гранях секции тигля в идеализированном варианте расчета холодного тигля не учитывается, поэтому плотность тока в торцевых частях внутреннего слоя холодного тигля возрастает (рис. 2,б). В распределении плотности тока вне зоны индуктора заметно обратное воздействие токов, индуцированных в расплаве. При $f_q=10$ Гц это влияние мало: ток во внутреннем слое холодного тигля начинает расти вне зоны индуктора. С ростом частоты плотность тока во внутреннем слое холодного

тигеля вне зоны индуктора (но в зоне расплава!) продолжает убывать и повышается только к торцам расплава. Максимумы плотности тока достигаются в торцевых зонах тигля.

На рис. 3,а показано распределение плотности тока по высоте расплава в ИПХТ-М (кривые а) в сравнении с соответствующим распределением в ИТП (кривые б). При $f_q=10$ Гц различия ИПХТ-М и ИТП малы, что согласуется со сказанным выше о прозрачности холодного тигля. При повышении частоты ЭМ поля индуктора экранируется холодным тиглем. Плотность тока на боковой поверхности расплава в ИПХТ-М растет с повышением частоты медленнее, чем в ИТП. При $f_q=250$ Гц максимальное значение плотности тока в расплаве ИПХТ-М составляет только 25% от соответствующего значения в ИТП. Из-за большой плотности тока в торцевых частях внутренней стенки холодного тигля максимальная

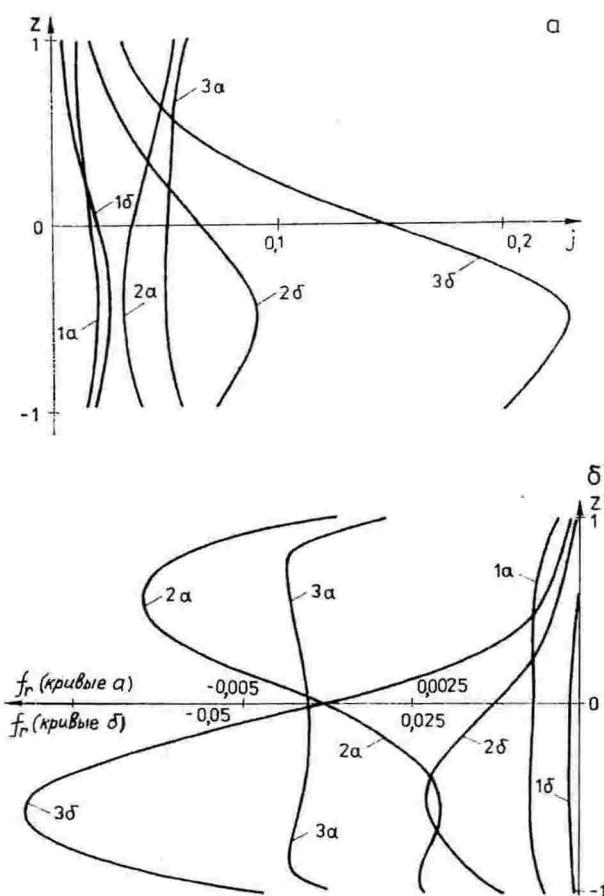


Рис. 3. Распределения плотности тока j (а) и радиальной компоненты плотности ЭМ силы f_r (б) по высоте расплава в его поверхностном слое для идеализированной модели ИПХТ-М (кривые а) и модели ИТП (кривые б) при следующих частотах тока в индукторе: $f_q=10; 50; 250$ Гц (1, 2, 3)

плотность тока в расплаве ИПХТ-М также достигается в торцевых частях. Распределение плотности тока по высоте расплава ИПХТ-М становится подобным распределению плотности тока в ИТП (тигель непроводящий!) при индукторе, высота которого равна или больше высоты расплава. Поскольку токи во внутреннем и наружном слоях холодного тигля в зоне индуктора при $f_q = 250$ Гц противовоздействуют (рис. 2,в), то созданные ими магнитные поля частично гасят друг друга так, что результирующая плотность тока в расплаве меньше, чем при учете токов только во внутреннем слое холодного тигля. Так как при частоте $f_q = 50$ Гц тигель более прозрачен, то этот эффект проявляется сильнее. Плотность тока в расплаве в зоне действия индуктора имеет минимум.

Такое распределение не типично в случае ИТП и, как будет показано далее, частично является следствием использованной идеализированной модели.

Радиальная компонента f_r плотности ЭМ силы практически постоянна по высоте расплава при $f_q = 10$ Гц и $f_q = 250$ Гц (рис. 3,б, 1, 3), когда тигель соответственно прозрачен и непрозрачен для ЭМ поля. При $f_q = 50$ Гц в случае частичной прозрачности тигля наблюдается минимальное значение f_r в зоне индуктора (рис. 3,б, кривая 2a), достигающее $1/3$ своего максимального значения.

Особенностью распределения плотности радиальной компоненты f_r ЭМ силы в ИПХТ-М при исследованной геометрии является также значительно меньший рост ее значений при увеличении частоты ЭМ поля: в ИТП максимальное значение f_r при $f_q = 250$ Гц в 50 раз больше, чем при $f_q = 10$ Гц; в ИПХТ-М — только в 6 раз.

При реальных рабочих режимах индуктора ($f_q = 2400$ Гц) в случае идеализированного холодного тигля ток в наружном слое имеет максимальное значение в активной зоне индуктора, резко спадая при выходе за пределы этой зоны (рис. 4, кривые «н»). Во внутреннем слое холодного тигля ток перераспределяется таким образом, что максимальное его значение приходится на зону расплава (рис. 4, кривые «в») независимо от расположения индуктора (рис. 1,а, положения I, II, III), и лишь на торцах холодного тигля наблюдается резкое повышение тока, объясняемое концевыми эффектами.

На рис. 5 показаны результаты, полученные при частоте $f_q = 50$ Гц с использованием «реальной» модели ИПХТ-М, учитывающей сопротивления боковых граней секций холодного тигля.

Из распределения плотности тока по высоте наружного слоя холодного тигля (рис. 5,а) видно, что для реальной модели ИПХТ-М при малом числе секций $m_c = 2$ сопротивление боковых граней не пре-

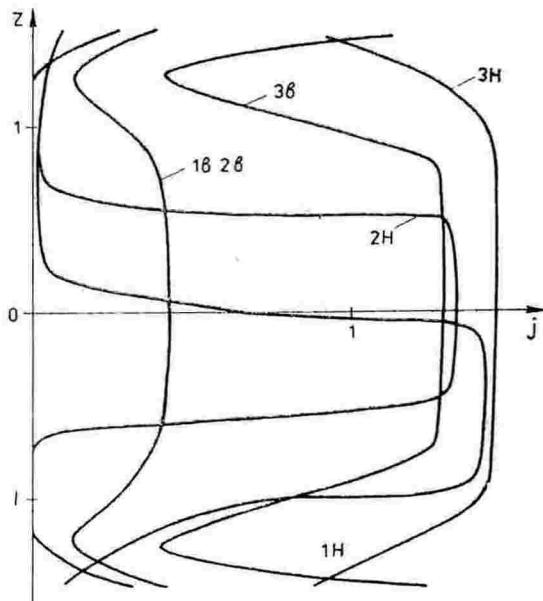


Рис. 4. Распределение по высоте плотности тока j в наружном и внутреннем слоях холодного тигля для идеализированной модели ИПХТ-М при частоте тока индуктора $f_q = 2400$ Гц (1, 2, 3 соответствуют различным расположениям индуктора на рис. 1)

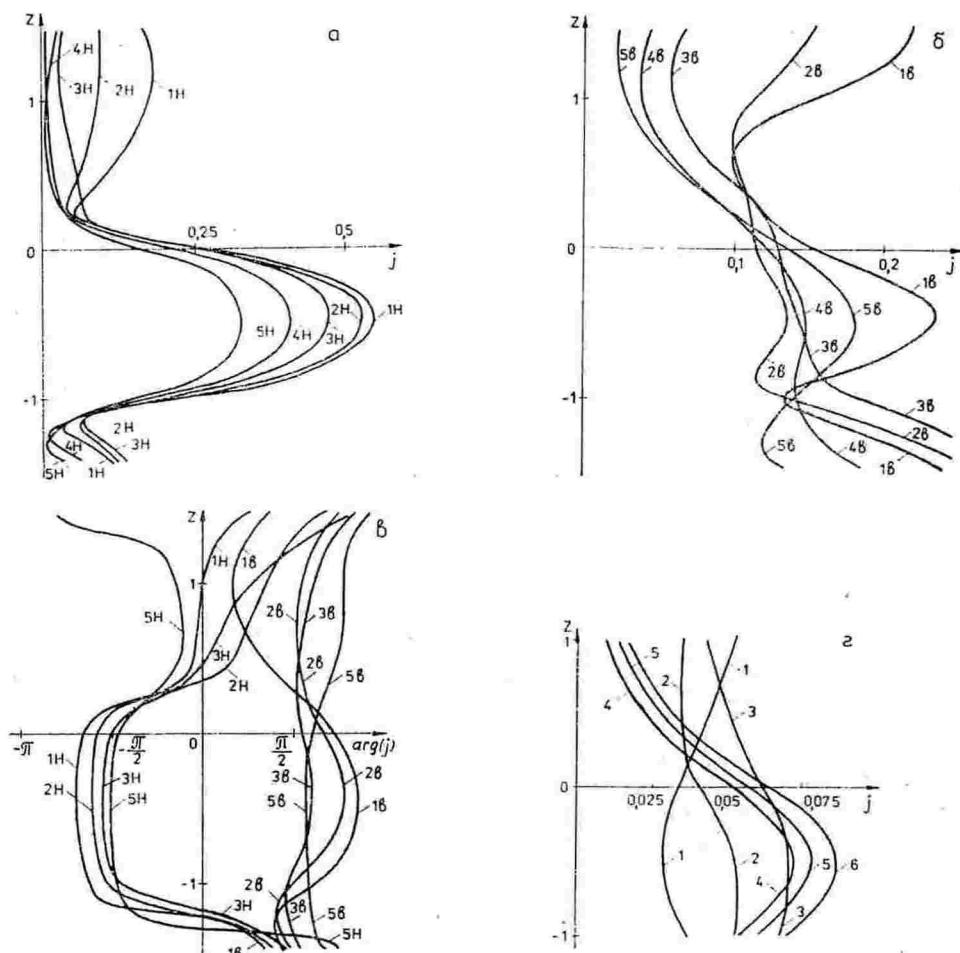


Рис. 5. Распределение по высоте плотности тока j в наружном (а, кривые «н») и внутреннем (б, кривые «в») слоях холодного тигля, соответствующих фазам тока $\arg(j)$ (б), а также плотности тока j в поверхностном слое расплава (г) для реальной модели ИПХТ-М с количеством секций холодного тигля $m_c=2; 4; 8; 16$ (2, 3, 4, 5) в сравнении с идеализированной моделью ИПХТ-М (1) и моделью ИТП (б)

пятствует перераспределению токов в секциях тигля в аксиальном направлении и результаты расчета близки соответствующим результатам для идеализированной модели. В наружном слое холодного тигля плотности тока в зоне индуктора для обеих моделей близки. При $m_c=16$ перераспределение токов по высоте тигля затруднено и распределение тока аналогично распределению в проводящем цилиндре. Убывание тока в торцевых зонах тигля с ростом числа секций объясняется влиянием сопротивления боковых граней (рис. 5, а, б). С ростом сопротивления замыкание токов вне зоны индуктора затрудняется и уменьшается влияние токов расплава на распределение токов по высоте секции тигля. Так, при $m_c=2; 4$ наблюдается выравнивание распределения плотности тока во внутреннем слое холодного тигля в зоне расплава (рис. 5, б), а также в самом расплаве (рис. 5, г). Это является промежуточным состоянием между монотонно убывающей в аксиальном направлении плотностью тока вне зоны индуктора при больших значениях числа секций ($m_c=16$) или в случае неразрезного проводника, и минимумом плотности тока в зоне индуктора, если сопротивление боковых граней секций не учитывается (идеализированная модель).

С ростом числа секций замыкание токов через концевые зоны тигля уменьшается (рис. 1,*б,в*), и изменения фазы тока по высоте внутреннего слоя холодного тигля становятся незначительными (рис. 5,*в*). Фаза тока в этом слое при $m_c > 4$ практически остается постоянной. В соответствии с этим меняется также распределение плотности тока в расплаве (рис. 5,*г*) от постоянного по высоте при идеальном тигле или при малом числе секций реального тигля до монотонно убывающей плотности тока вне зоны индуктора при большом числе секций реального тигля и в печи с непроводящим тиглем.

Выводы: 1. Максимально возможные изменения ЭМ полей в ИПХТ-М по сравнению с индукционной печью с керамическим тиглем выявляются численным исследованием идеализированной модели холодного тигля.

2. Качественный характер распределения по высоте индуцированного тока в расплаве при идеализированном и непрозрачном для ЭМ поля холодном тигле зависит только от распределения тока во внутреннем слое тигля, характер которого сохраняется при изменении высоты индуктора и его расположения по высоте холодного тигля.

3. Учет сопротивления боковых граней холодного тигля снижает эффект перераспределения токов по высоте, характерный для идеализированного тигля.

4. В случаях низкой частоты тока в индукторе (холодный тигель прозрачен для ЭМ поля) или при большом сопротивлении боковых граней секций холодного тигля для приближенного расчета ИПХТ-М можно не учитывать влияния холодного тигля и использовать модель и методику расчета, разработанную для ИТП.

5. При моделировании ЭМ полей в случае реальных рабочих параметров индуктора ($f_q > 2\text{ кГц}$) необходимы расчеты в соответствии с «реальной» моделью, учитывающей сопротивление боковых граней секций холодного тигля ИПХТ-М.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетхерс У. А., Муйжниекс А. Р., Никифорова Н. В. и др. Численное моделирование электромагнитного поля в меридиональном сечении индукционной печи с разрезным проводящим тиглем // Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук. — 1989. — № 1. — С. 81—88.
2. Никифорова Н. В., Павлов С. И., Тир Л. Л., Якович А. Т. Численное исследование электромагнитных и гидродинамических полей в индукционной печи с холодным тиглем (меридиональное сечение) // XII Рижское совещ. по магнитной гидродинамике. — Саласпилс: Институт физики АН ЛатвССР, — 1987. — Т. 2. — С. 227—230.

NUMERICAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN INDUCTION FURNACE DEPENDING ON COLD CRUCIBLE SEGMENT NUMBER AND COIL CURRENT FREQUENCY

N. Nikiforova, S. Pavlov, A. Yakovich

Summary

The height redistribution of eddy current in cold crucible and melt of induction furnace (IFCC) is studied on the basis of a previously developed mathematical model and numerical procedure using also «ideal» & «real» models of the lateral faces of crucible section. The following dependences were considered: 1) on the frequency of coil current ($f_q = 10; 50; 250; 2400 \text{ Hz}$); 2) on the coil location ($f_q = 2400 \text{ Hz}$); 3) on the number of sections ($m_c = 2; 4; 8; 16$) of cold crucible ($f_q = 50 \text{ Hz}$). The results are compared with induction coreless furnace (ICF).

Поступило 30.10.88