

УДК 621.365.5
DOI: 10.12737/article_58ef809020aca5.67021741

Г.Е. Левшин, д.т.н.
(Алтайский государственный технический университет
им. И. И. Ползунова, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46)
E-mail: levshing@mail.ru

О движении расплава в индукторной тигельной печи

Представлены шесть гипотез о характере, причинах и движущих силах циркуляции расплава и образования выпуклого мениска в индукторных тигельных печах с вертикальным магнитным потоком. Приведены гипотетические математические описания этих явлений и показана их недостаточность из-за использования опосредованных понятий индуктированной и удельной поверхностной мощностей без учета двух электромагнитных сил. Рассмотрена физическая суть магнитогидродинамических явлений на основе изучения распределения векторов магнитной индукции в воздухе и расплаве и их взаимодействия в расплавах.

Ключевые слова: индукторные тигельные печи; движение расплава; контурная циркуляция; выпуклый мениск; индукция.

G.E. Levshin, D. Eng.
(Polzunov State Technical University of Altay,
46, Lenin Avenue, Barnaul, 656038)

On melt motion in induction crucible furnace

This paper reports the presentation of six hypotheses on character, reasons and driving forces of a melt circulation and a convex meniscus in induction crucible furnaces with a vertical magnetic flux. There are shown hypothetical mathematical descriptions of these phenomena and their insufficiency because of the indirect notions use of induced and specific surface capacities without taking into account two electromagnetic forces is shown. A physical essence of magnetic hydro-dynamic phenomena is considered on the basis of study of magnetic induction vectors distribution in air and a melt and their interaction in melts.

Keywords: induction crucible furnaces; melt motion; contour circulation, convex meniscus.

В плавильной индукторной индукционной тигельной печи (ИТП) однофазный индуктор выполнен в виде цилиндрической однослойной спиральной электрической катушки с числом витков w , имеет высоту h , близкую к внутреннему диаметру $D_{\text{вн}} = 2r_{\text{вн}}$. Их отношение $h/D_{\text{вн}} = 0,8 \dots 1,5$.

При прохождении тока I частотой f по виткам w индуктора он создает магнитодвижущую силу Iw . В результате в воздухе (без садки) получается очень неоднородный тороидальный магнитный поток Φ (поле) с разным

направлением результирующих векторов индукции B_{ep} относительно центра индуктора, а также неравномерным распределением величины индукции как в его рабочей полости, так и вне ее, обуславливающим наличие градиента B_{ep} (рис. 1) [1 – 3].

Магнитная индукция B_{ep} является векторной величиной и основной силовой характеристикой магнитного поля. Наряду с ней используют вспомогательную векторную величину напряженности магнитного поля H_{ep} , которые в вакууме и воздухе связаны соотноше-

нием $B_{ep} = \mu_0 \mu_e H_{ep}$, а в расплавах – $B_{ip} = \mu_0 \mu_i H_{ip}$, где $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\mu_e = 1$ – относительная магнитная проницаемость вакуума, воздуха – 1,000038; μ_i – относительная магнитная проницаемость расплава.

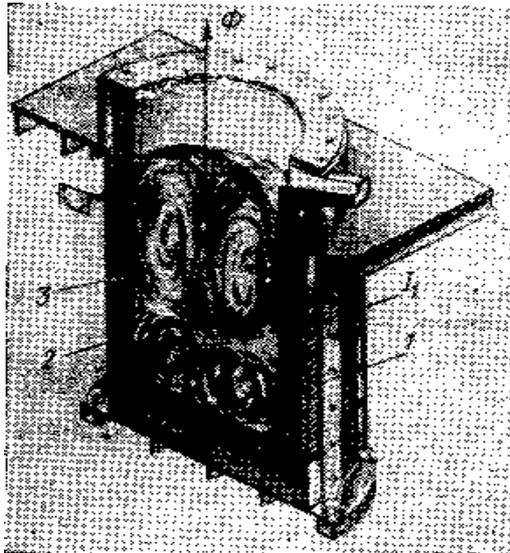
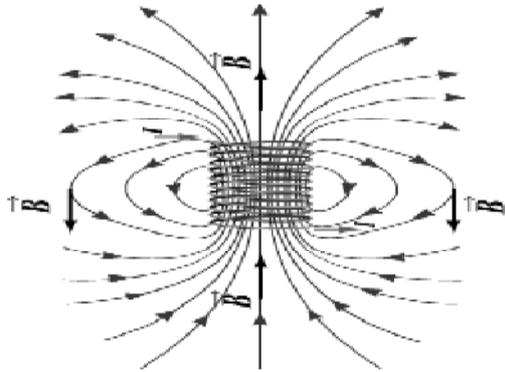


Рис. 1. Схемы магнитного потока индуктора и двухконтурной циркуляции [1 – 3]

В продольном сечении полости индуктора видно (рис. 1), что картина поля индукции в левой половине симметрична картине в правой половине, а картина поля в верхней половине симметрична картине в нижней половине. Это приводит и к попарной симметрии картин поля в левом и правом верхних квадрантах, а также левом и правом нижних квадрантах. Симметричны также попарно картины поля в левых верхнем и нижнем квадрантах и правых верхнем и нижнем квадрантах.

Такие особенности рабочего потока $\Phi_{раб}$ являются, по всей видимости, одной из основных причин специфического движения расплава в тигле ИТП с образованием выпуклого

мениска и двухконтурной циркуляции (см. рис. 1) [1, 2, 4]. Положительное и отрицательное влияние этого движения в заключительном периоде плавки на состояние тигля, длительность плавки, свойства расплава и отливки рассмотрены в [4, 5]. Показано, что оно является скорее недостатком, чем достоинством ИТП. Из-за сложности этого явления оно раскрыто в доступной литературе по индукционным печам и плавке недостаточно полно и даже противоречиво в виде шести гипотез [6 – 11].

Рассмотрим эти гипотезы по мере развития представлений об этом движении, усложнения и подробности их описания.

Г1. Наиболее кратко и просто эти представления изложены в [6]: ИТП состоит из двух concentрических проводников – внешнего (индуктора) и внутреннего (расплава), – токи в которых противоположно направлены и, естественно, должны отталкиваться. В результате отталкивания происходит поднятие средней части расплава плотностью γ с образованием выпуклого мениска (рис. 2, а). Высоту h_m мениска предложено оценивать (для бесконечно высокого индуктора) как

$$h_m = 6,41 \cdot 10^{-5} (Iw)^2 / \gamma, \text{ см.} \quad (1)$$

В реальном же индукторе высота h_m значительно меньше и не превышает 15 % высоты h расплава в тигле. Такой высоты мениска вполне достаточно, чтобы вызвать энергичное одноконтурное движение расплава во всем объеме тигля в направлении от вертикальной оси к стенкам тигля и его дну (рис. 2, а). Расчеты сил отталкивания и их направление не приведены.

Г2. Другое весьма краткое мнение изложено в [7]: «Взаимодействие индуцированных электрических токов в расплаве с результирующим магнитным полем B вызывает механическую силу (силу Лоренца), которая изменяется от нуля до максимального значения с удвоенной частотой источника питания. Вследствие инерции массы расплава на него действует только усредненная во времени составляющая силы. Действие ее проявляется двояко: 1) электромагнитное давление может привести к деформации поверхности расплава; 2) если силы в расплаве имеют вихревой характер, это заставляет расплав двигаться соответствующим образом». Расчеты силы Лоренца, ее направление и другие объяснения не приведены.

Г3. По Вайнбергу А.М. [8] выпуклый ме-

ниск и двухконтурное движение расплава создаются под действием электродинамических горизонтальных радиальных сил $F_{эл}$ на боковую цилиндрическую поверхность $\Pi_{ц}$ расплава (рис. 2, б). Причем максимальное давление (до 0,1 МПа) создается этими силами вблизи поперечной оси цилиндра и убывает к краям индуктора, образуя клиновидную эпюру сил. Оно выдавливает расплав вдоль оси тигля на такую высоту h_m , при которой гидростатическое давление столба металла уравнивает электродинамическое давление согласно формуле (1).

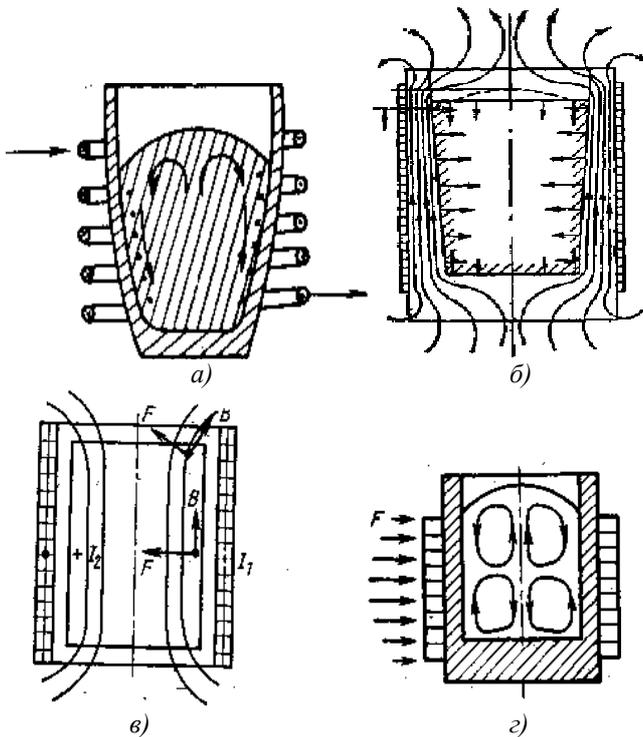


Рис. 2. Схемы потоков циркуляции (а, з) и действующих сил (б, в, з) [6, 3, 10]

Кроме того, на торцовые поверхности Π_t расплава действуют также и вертикальные электродинамические силы, порождаемые горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля. Они имеют максимальную величину вблизи стенки тигля и равны нулю у оси и поэтому понижают уровень расплава вблизи стенок и увеличивают выпуклость мениска и циркуляцию (пунктир на рис. 2, б).

Направление электродинамической двухконтурной циркуляции расплава определяется из направления относительной величины электродинамических сил в расплаве, которые создают максимальное давление в центре на оси тигля и несколько меньшее вблизи поверхности ванны и у дна. Это вызывает вы-

давливание металла вдоль оси тигля вверх и вниз и перетекание металла к краям тигля на поверхности и у дна (эффект «фонтана»). Источник, характер и расчеты электродинамических сил не приведены.

Г4. Расплав с удельным электросопротивлением ρ обжимается в ИТП электромагнитным полем с напряженностью H_e (до $10^{-4} \dots 10^{-5}$ А/м). В средней по высоте части цилиндрического тигля, где не сказывается краевой эффект, силы электродинамического взаимодействия индуктированного тока и магнитного поля индуктора направлены радиально к оси цилиндра и убывают от максимального значения на поверхности до нуля на оси [9]. Создаваемое этими силами давление сжатия $p_{сж}$ возрастает от цилиндрической поверхности к вертикальной оси и может быть оценено как:

$$p_{сж} = \pi \cdot 10^{-7} H_e^2 = 3,16 \cdot 10^{-4} P_{пов} / (f\rho)^{0,5}, \quad (2)$$

где $H_e^2 = 2P_{пов} \delta / \rho$; δ – глубина проникновения тока в цилиндрическую поверхность расплава, м; $P_{пов}$ – удельная поверхностная мощность, Вт/м².

Формула (2) показывает, что при неизменной мощности, передаваемой в расплав, силовое воздействие на него усиливается с понижением частоты f и сопротивления ρ .

Из-за малого отношения $h / D_{вн} = 0,8 \dots 1,5$ электродинамические силы направлены строго радиально только в средней по высоте части тигля. Ближе к верхнему и нижнему краям тигля, где магнитное поле искажается, и линии его не идут параллельно оси, появляется аксиальная составляющая электродинамических сил, а радиальная составляющая уменьшается. Поэтому в средней части тигля расплав перетекает от периферии к оси, затем по оси тигля выжимается вверх к зеркалу ванны и вниз ко дну тигля. Вверху и внизу он перетекает к стенкам и вдоль стенок возвращается к средней части тигля, совершая двухконтурную циркуляцию.

При радиальном направлении сил по всей высоте тигля высота мениска определяется из условия равенства электродинамического давления на оси тигля $p_{сж}$ и гидростатического давления столба металла высотой h_m по другой формуле:

$$h_m = 0,32 \cdot 10^{-4} P_{пов} / \gamma (f\rho)^{0,5}. \quad (3)$$

При реальной же картине поля высота мениска получается несколько меньше. Она не

должна превышать 15 % полной высоты металла по оси тигля.

Таким образом, силы электродинамического взаимодействия индуцированного тока и магнитного поля индуктора и создаваемое ими давление $p_{сж}$ сжатия направлены радиально к оси тигля и убывают от максимума на поверхности до нуля на оси. Кроме того, они имеют максимум в среднем поперечном сечении и убывают к краям индуктора, образуя клиновидную эпюру. Такое распределение сил вызывает перетекание расплава от периферии к оси, затем по оси тигля он выжимается вверх к зеркалу ванны (с образованием мениска) и вниз ко дну тигля (эффект «фонтана»). Вверху и внизу он перетекает к стенкам и вдоль стенок возвращается к средней части тигля, совершая двухконтурную циркуляцию. Это объяснение движения аналогично ГЗ, но электромагнитное давление на зеркало и дно расплава не рассматривается. Для расчетного определения давления $p_{сж}$ и высоты h_m используется опосредованная электрическая величина $P_{пов}$ удельной поверхностной мощности.

Г5. По Брокмайеру К. [10] в электромагнитном поле с напряженностью E электрического поля и H магнитного поля на атомы и благодаря этому на газообразные, жидкие и твердые вещества воздействуют механические силы. Суммарная сила математически представляется вектором $F = \int f dV$. Плотность силы f , действующей на единичный объем dV , состоит из нескольких компонентов (обозначения оригинала): $f = f_{эл} + f_m + f_{эл.имп.}$

В гауссовой системе единиц

$$\begin{aligned} f_{эл} &= \rho E - E \operatorname{grad} \varepsilon / 8\pi; \\ f_m &= [j \times B] / c - H^2 \operatorname{grad} \mu / 8\pi; \\ f_{эл.имп.} &= (\varepsilon \mu / 4\pi c) \partial [EH] / \partial t, \end{aligned}$$

где ε и μ – относительные электрическая и магнитная проницаемость; j – плотность индуцированного тока в расплаве, A/mm^2 ; c – скорость света.

Из-за весьма малой величины E и H в немагнитных расплавах значениями $f_{эл}$ полностью и соответствующей части f_m можно пренебречь. Тогда сила в магнитном поле

$$F_m = 10,2 \int [j \times B] dx,$$

где B – индукция, $B \cdot c/cm^2$; dx – элементарная длина, см; A – сила электромагнитного импульса (излучения);

$$F_{эл.имп.} = 31,6 P_{пов} 10^{-4} / (\rho f)^{0,5}, \text{ кг}, \quad (4)$$

где $P_{пов} = P_{инд} / \pi d h$ – удельная поверхностная мощность, kBt/cm^2 ; ρ – удельное электросопротивление, $\Omega \cdot mm^2/m$; $P_{инд} = 1,987 \cdot 10^{-9} \cdot H^2 \cdot m(\rho f)^{0,5}$ – мощность, индуцированная в расплаве, kBt/cm^2 ; m – коэффициент, зависящий от отношения глубины δ проникновения индуцированного тока в цилиндрическую поверхность сплошного тела к его диаметру d и определяемый по графику. В большинстве случаев $m = 0,8 \dots 1,0$.

Теоретически силы F_m и $F_{эл.имп.}$ проявляются всегда вместе, но сила $F_{эл.имп.}$ в ИТП преобладает, а остальными силами можно пренебречь.

После замены значения $P_{пов}$ можно оценить электромагнитное давление на цилиндрическую поверхность расплава

$$p_m = 31,6 P_{инд} \cdot 10^{-4} / \pi d h (\rho f)^{0,5}. \quad (5)$$

Векторы силы $F_{эл.имп.}$ в пространстве перпендикулярны поверхности, образованной магнитным полем и электрическим током, а на краях появляется также и аксиальная составляющая (рис. 2, в). Под действием радиальных сил поверхность расплава приобретает выпуклый мениск. Его высота h_m увеличивается, пока не сравняются металлостатическое γh_m и электродинамическое p_m давления. Тогда

$$h_m = 31,6 P_{инд} \cdot 10^{-4} / \gamma \pi d h (\rho f)^{0,5}. \quad (6)$$

Механические силы в электромагнитном поле могут быть увеличены до такой степени, что расплав будет находиться во взвешенном состоянии.

Таким образом, выпуклый мениск и двухконтурное движение расплава создаются под действием давления p_m горизонтальных радиальных сил $F_{эл.имп.}$ на боковую поверхность расплава (с их распределением в клиновидной эпюре) (рис. 2, в, з). Аксиальная составляющая сил не учитывается. Для расчетного определения давления p_m и высоты h_m используется опосредованная электрическая величина $P_{инд}$ индуцированной в расплаве электрической мощности.

Г6. Наиболее подробно изложена шестая гипотеза [11]. Между расплавом (диаметром d и текущим радиусом r), по которому протекает индуцированный ток, и магнитным полем H_e индуктора имеется силовое взаимодействие. Удельная электродинамическая (объемная) сила, действующая на единицу объема dV расплава, равна

$$F_{уд} = dF/dV = \mu_i \gamma P_{пов}, \text{ Н/м}^3,$$

где $P_{пов} = 2,78 \cdot 10^{-6} \text{ Н}_e^2 d^2 \mu_i f \Psi_a$ – удельная поверхностная активная электрическая мощность, подводимая к расплаву; Ψ_a – вспомогательная графическая функция.

Направление силы $F_{уд}$ совпадает с направлением потока энергии (вектора Умова-Пойнтинга).

Электромагнитное давление в точке, отстоящей от «активной» поверхности расплава на расстоянии x , равно

$$p_m = \int F_{уд} dx = \mu_i \gamma \int P_{пов} dx, \text{ Н/м}^2.$$

Возможно определение силы, действующей на расплав в точке с радиусом r , по формуле

$$F_{уд} = \mu_i \text{Н}_e^2 F_{оц}/\delta,$$

где $F_{оц}$ – вспомогательная графическая функция $F_{оц} = f(r)$.

На активной цилиндрической поверхности расплава сила $F_{уд}$ имеет максимальное значение, а электромагнитное давление $p_m = 0$; и, наоборот, на его оси максимально p_m , а сила $F_{уд} = 0$.

Электродинамические силы F оказывают статическое и динамическое воздействия на расплав. Первое приводит к электромагнитному обжатию расплава, а второе – к его циркуляции (перемешиванию).

В сильном магнитном поле расплав стремится покинуть его или занять в нем место, где напряженность Н_e минимальна. Это проявляется в изменении положения расплава, его формы (вплоть до принятия формы магнитных силовых линий) и деформации его поверхности. Поэтому верхняя часть расплава отжимается от стенок тигля и приобретает форму выпуклого мениска, конфигурация которого не стабильна и зависит от величины Н_e и взаимного расположения мениска и верхнего торца индуктора.

В невысоких индукторах величины Н_e и B_e у его торцов меньше, чем в среднем поперечном сечении (продольный краевой эффект). Поэтому в средней части индуктора силы F максимальны, а у торцов существенно меньше. Направление сил радиальное, а эпюра сил клиновидная. Они «выдавливают» расплав вдоль оси тигля вверх (в верхней половине индуктора) и вниз (в нижней его половине) и он возвращается в обратном направлении вдоль стенок тигля, образуя двухконтурную естественную циркуляцию (эффект «фонтана»).

Интенсивность циркуляции характеризуется скоростью v движения (чаще всего турбулентного) в интересующей зоне тигля, являющейся результатом взаимодействия разных сил (электромагнитных, вязкого и турбулентного трения). Ее величина зависит от конструкции и назначения печи и может отличаться в десятки раз: от $\sim 5 - 10$ см/с (в среднечастотных печах или в миксерном режиме) до $\sim 5...10$ м/с (в мощных печах $f = 50$ Гц). При этом электродинамические явления могут сопровождаться мощными пульсациями, деформацией поверхности, выбросами частичек расплава из тигля и звуковыми эффектами.

Весьма интересно, что вертикальная составляющая скорости v равна нулю: – при $r \approx R$ (радиуса расплава) у стенки тигля из-за трения; – при $r \approx 0,65R$, где встречаются противоположные потоки расплава; – в среднем поперечном сечении индуктора, в зоне стыка верхнего и нижнего циркуляционных контуров.

Таким образом, между расплавом, по которому протекает индуцированный ток, и магнитным полем индуктора имеется силовое взаимодействие. На единицу объема расплава действует удельная электродинамическая (объемная) сила $F_{уд}$, направленная радиально к вертикальной оси. Эпюра сил клиновидная. Возможно определение значения силы в точке с радиусом r . Аксиальная составляющая сил не учитывается и высота мениска не рассчитывается. Для расчетного определения давления p_m используется опосредованная электрическая величина $P_{пов}$ индуктированной в расплаве удельной электрической мощности.

Обсуждение результатов. Анализ этих гипотез показывает.

1. Различие в терминах и определении главных источников (причин) движения расплава, затрудняющее понимание существа явления, как в отдельной гипотезе, так и в их совокупности, а именно:

в гипотезе Г1 – это отталкивание противоположно направленных токов согласно закону Ампера в его первой редакции (для случая двух параллельных проводников), где не учитываются магнитные поля этих токов;

Г2 – механическая сила Лоренца как результат взаимодействия индуктированных в расплаве токов с результирующим магнитным полем;

Г3 – действие электродинамических горизонтальных радиальных сил $F_{эл}$ на боковую цилиндрическую поверхность $\Pi_{ц}$ расплава, а вертикальных – на торцовые поверхности $\Pi_{т}$

расплава;

Г4 – расплав обжимается в ИТП электромагнитным полем с напряженностью H_e ;

Г5 – в электромагнитном поле с напряженностью E электрического поля и H магнитного поля на атомы жидких веществ действуют механические силы;

Г6 – силовое взаимодействие между расплавом, по которому протекает индуцированный ток, и магнитным полем H_e индуктора согласно закону Ампера в последующей редакции (для случая проводника в магнитном поле), где вместо тока индуктора учитывается величина создаваемого им магнитного поля.

По мнению автора во всех гипотезах, кроме Г2, речь идет об электромагнитных силах отталкивания магнитных полей токов: индуктора и индуцированного.

2. *Различие в терминах и определении главных источников (причин) образования выпуклого мениска и формулах для его расчета:*

Г1) в результате отталкивания происходит поднятие средней части расплава плотностью γ с образованием выпуклого мениска высотой $h_m = 6,41 \cdot 10^{-5} (Iw)^2 / \gamma$;

Г2) электромагнитное давление может привести к деформации поверхности расплава;

Г3) выпуклый мениск создается под действием электродинамических радиальных сил $F_{эл}$ на цилиндрическую поверхность $\Pi_{ц}$ расплава, а его высота увеличивается под действием вертикальных сил на торцовые поверхности $\Pi_{т}$ расплава вблизи стенок тигля и определяется по формуле $h_m = 6,41 \cdot 10^{-5} (Iw)^2 / \gamma$;

Г4) при радиальном направлении сил по всей высоте тигля высота мениска определяется из условия равенства электродинамического давления на оси тигля $p_{сж}$ и гидростатического давления столба металла высотой h_m по формуле $h_m = 0,32 \cdot 10^{-4} P_{пов} / \gamma(\rho f)^{0,5}$;

Г5) высота h_m определяется из равенства металостатического γh_m и электродинамического p_m давления на цилиндрическую поверхность расплава

$$h_m = 31,6 P_{инд} \cdot 10^{-4} / \gamma \pi d h (\rho f)^{0,5};$$

Г6) электродинамические горизонтальные силы оказывают статическое воздействие на расплав, приводящее к его электромагнитному обжатию. Поэтому верхняя часть расплава отжимается от стенок тигля и приобретает форму выпуклого мениска.

Обратим внимание на использование в математическом описании опосредованных величин индуцированной $P_{инд}$ и удельной поверхностной $P_{пов}$ мощностей вместо прямых

величин тока, ЭДС и индукции. Это вуалирует изучаемое явление.

3. *Различие в терминах и определении движущих сил (причин) циркуляции расплава, в том числе двухконтурной:*

Г1) под влиянием высоты мениска, обуславливающей металостатическое давление, образуется (см. рис. 2, а) одноконтурная циркуляция расплава по часовой стрелке в правой половине тигля и против часовой стрелки в левой;

Г2) если силы в расплаве имеют вихревой характер, это заставляет расплав двигаться соответствующим образом;

Г3) направление электродинамической двухконтурной циркуляции расплава определяется из направления относительной величины электродинамических сил в расплаве, которые создают максимальное давление в центре на оси тигля и несколько меньшее вблизи поверхности ванны и у дна, образуя клиновидную эпюру сил. Это вызывает выдавливание металла вдоль оси тигля вверх и вниз и перетекание металла к краям тигля на поверхности и у дна (эффект «фонтана»). Перетеканию способствуют вертикальные силы, особенно вблизи стенок тигля. В правом верхнем квадранте циркуляционные потоки расплава замыкаются по часовой стрелке, а в правом нижнем квадранте – против часовой. В левой половине направление потоков зеркальное (см. рис. 2, б, в);

Г4) – Г6) объяснение аналогично предыдущему, но без учета действия вертикальных сил.

Особо отметим, что в Г1 предполагается одноконтурная циркуляция, что значительно отличает ее от Г3 – Г6. Г2 предполагает вихревой характер сил, но не объясняет достоверно их источник и направление. В Г1 и Г3–Г6 направление циркуляционных потоков у мениска одинаковое: от вертикальной оси к стенкам тигля под действием эффекта «фонтана». Однако не объяснена степень воздействия на эти потоки результирующих сил отталкивания, направленных противоположно потокам.

Перечисленные гипотезы можно дополнить важными сведениями из другого источника [1].

Так, считалось [1], что интенсивность индуктивного перемешивания SI линейно связана с высотой мениска в печи:

$$h_m = 7050 P / dh \gamma (\rho f)^{0,5}, \text{ дюйм,}$$

где P – мощность печи, кВт .

Высота же мениска связана прямой зависимостью с мощностью и обратной зависимостью с квадратным корнем частоты. Практика показала неточность такого описания перемешивания, т.к. в опытах при изменении частоты и, соответственно, интенсивности SI высота мениска h_m оставалась постоянной. Компания «Индуктотерм» в середине 1970-х гг. установила, что высота мениска h_m определяется силой взаимодействия магнитного поля индуктора и индукционных токов плотностью j согласно векторному произведению: $F = B_e \times j$. При этом обнаруживается, что SI в гораздо большей степени зависит от частоты тока, чем от высоты мениска [1]:

$$SI = 600001[(P D_{вн})/(\gamma \rho f)^{0,5} / 0,785 (D_{вн})^2.$$

Рекомендуемые величины $SI = 40..55$ (для расплавов чугуна) и $55...80$ (для алюминия).

Математическим моделированием по не приведенной модели с помощью несовершенных программ, имеющих погрешности и неточности при установлении критериев для пограничных условий и свойств расплава, применительно к чугуноплавильной печи MFT Ge вместимостью 4 т и высотой индуктора 1085 мм (при мощности 3 МВт и частоте 250 Гц) показано:

– наличие двух тороидальных контуров циркуляции расплава с вращением его потоков в правой половине по часовой стрелке в верхнем квадранте и против часовой стрелки в нижнем квадранте (рис. 3) [1];

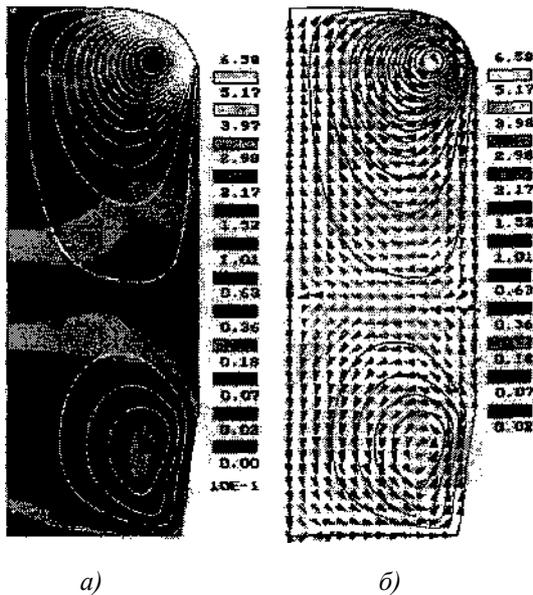


Рис. 3. Спектр потоков, м/с:
а – скорости потоков; б – векторы потоков [1]

– заметное влияние высоты расплава на расчетные значения скорости потоков, распределения температуры по его высоте и электромагнитного давления, особенно в поверхностном слое мениска;

– при высоте расплава 1070 мм расчетное электромагнитное давление на его мениске составляет $\sim 7,5$ кПа, а в его поверхностном слое толщиной ~ 120 мм это давление превышает металлостатическое на $\sim 7,5$ кПа, затем это превышение постепенно уменьшается до высоты ~ 760 мм, когда они становятся равными 20 кПа, после чего металлостатическое давление становится преобладающим. При увеличении высоты расплава на 100 мм до 1170 мм металлостатическое и электромагнитное давления практически одинаковы в поверхностном слое толщиной ~ 220 мм. При дальнейшем увеличении высоты расплава на 200 мм до 1270 мм металлостатическое давление всегда больше электромагнитного;

– снижение расчетных скоростей потоков при высоте расплава 1070 мм (сверху вниз): в верхнем квадранте с 6,58 до 1,01 м/с и \sim с 1,0 до 0 м/с в нижнем квадранте. Причиной является постепенное уменьшение превышения электромагнитного давления над металлостатическим до высоты ~ 760 мм, когда они становятся равными 20 кПа, а затем преобладание металлостатического давления. При увеличении же высоты расплава на 250 мм (до 1370 мм) расчетная скорость потоков снизилась в верхнем слое с 6,58 до 3,52 м/с с соответствующим уменьшением ее в нижележащих слоях;

– аналогичное постепенное снижение расчетных температур с 1591 °С у выпуклого мениска до 1497 °С у дна (на ~ 94 °С) из-за постепенного подавления металлостатическим давлением электромагнитных сил и конвективных потоков. Повышение же высоты расплава с 1070 до 1320 мм незначительно увеличило расчетную температуру в верхнем слое с 1591 до 1599 °С и заметно уменьшило температуру у дна (с 1497 до 1467 °С). Это свидетельствует о недостаточном перемешивании всего объема расплава до этого момента.

Заключение

Наличие шести отличающихся гипотез позволяет подтвердить первоначальный вывод о недостаточной изученности характера, причин и движущих сил перемещения расплава в ИТП с односекционным индуктором, т.к. не обнаружены достоверные экспериментальные ис-

следования, подтверждающие или опровергающие наличие одно- или двухконтурной циркуляции при отношении $h/D_{\text{вн}}=0,8\dots 1,5$.

Использование опосредованных понятий индуктированной $P_{\text{инд}}$ и удельной поверхностной $P_{\text{пов}}$ мощностей для объяснения этого сложного явления оказалось малопродуктивным, т.к. завуалировало его математическое описание.

Не объяснена степень воздействия результирующих сил отталкивания на поверхностные циркуляционные потоки у мениска, направленных противоположно этим потокам.

Не выяснена роль силы Лоренца и пондеромоторной (затягивающей) силы, действие которой на расплав обусловлено градиентом индукции в неоднородном магнитном поле [3].

Для решения этой проблемы целесообразно более тщательно рассмотреть физическую суть этих магнитогидродинамических явлений на основе изучения распределения векторов индукции как внешнего (в воздухе), так и внутреннего (в расплаве) магнитных полей и их взаимодействия в расплавах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Современные** плавильные агрегаты: сборник. – М.: ИТЦМ Metallurg, 2014. – 370 с.
2. **Егоров, П.В., Моржин, А.Ф.** Электрические печи (для производства сталей). – М.: Metallurgiya, 1975. – 352 с.
3. **Бэрк, Г. Ю.** Справочное пособие по магнитным явлениям. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.
4. **Левшин, Г.Е.** Научно-технические технологии индукционной плавки в индукторных и электромагнитных тигельных печах // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 3(57). – С. 12 – 21.
5. **Левшин, Г.Е., Малышев, И.В.** Об индукционных тигельных печах и плавке // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 7 – 13.
6. **Фарбман, С.А. Колобнев, И.Ф.** Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. – М.: Metallurgiya, 1968. – 496 с.

7. **Данилов, Н.И., Я. М. Щелоков, Я.М.** Основы энергосбережения. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 564 с.

8. **Вайнберг, А. М.** Индукционные плавильные печи. – М-Л.: Энергия, 1960. – 456 с.

9. **Индукционные тигельные печи** /Л. И. Иванова, Л. С. Грובהва, Б. А. Сокунов, С. Ф. Сарапулов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. – 87 с.

10. **Брокмайер, К.** Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1972. – 304 с.

11. **Фомин, Н. И., Затоловский, Л. М.** Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Metallurgiya, 1979. – 247 с.

REFERENCES

1. *Modern Smelting Units: collection.* – М.: ITCM Metallurgist, 2014. – pp. 370.
2. Yegorov, P.V., Morzhin, A.F. *Electric Furnaces (for steel manufacturing).* – М.: Metallurgy, 1975. – pp. 352.
3. Berk, G.Yu. Reference Manual on Magnetic Phenomena. – М.: Energoatomizdat, 1991. – pp. 384.
4. Levshin, G.E. Science intensive technologies of induction melting in inductor and electromagnetic crucible furnaces // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2016. – № 3(57). – pp. 12 – 21.
5. Levshin, G.E., Malyshev, I.V. On induction crucible furnaces and melting // *Blank Production in Mechanical Engineering.* – 2016. – № 3. – pp. 7 – 13.
6. Farbman, S.A. Kolobnyov, I.F. *Induction Furnaces for Metal and Alloy Melting.* – М.: Metallurgy, 1968. – pp. 496.
7. Danilov, N.I., Shchelokov, Ya.M. *Energy-Saving Fundamentals.* – Yekaterinburg: SEI IVE USTU-UPI, 2006. – pp. 564.
8. Weinberg, A. M. *Induction Melting Furnaces.* – M-L.: Energy, 1960. – pp. 456.
9. *Induction Crucible Furnaces* /L. I. Ivanova, L.S. Grobova, B. A. Sokunov, S. F. Sarapulov. Yekaterinburg: Publishing House of USTU-UPI, 2002. – pp. 87.
10. Brokmayer, K. *Induction Melting Furnaces.* – М.: Energy, 1972. – pp. 304.
11. Fomin, N. I., Zatulovsky, L. M. *Electric Furnaces and Induction Heating Plants.* – М.: Metallurgy, 1979. – pp. 247.

Рецензент д.т.н. Г.А. Околович

