

3-4

2006

**ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Посвящается
85-летию
Донецкого
национального
технического
университета

**Металл
культуре
Украины**

наука техника технология бизнес

С.П.Ероных, доктор техн. наук, А.Н.Смирнов, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой, А.Ю.Цупрун, И.Н.Салмаш, аспирант (ДонНТУ)

Модельные исследования гидродинамики процессов перемешивания стали в ковшах малой вместимости

Развитие концепции мини- и микроразоводов, ориентированных на выпуск сравнительно небольших объемов высококачественной металлопродукции [1], и специфика решаемых при этом задач, обусловленная особенностью условий работы машин и агрегатов малой производительности, требуют нетрадиционных подходов в организации и проведении комплексных исследований процессов тепло- и массопереноса, протекающих в ванне разливочных ковшей вместимостью 10-50 т во время внепечной обработки стали, предполагающей использование электромагнитного перемешивания расплава или его продувку через донные пористые пробки [2, 3].

При обосновании целесообразности реализации технологии внепечной обработки стали, включающей внешнее воздействие на гидродинамическое состояние жидкой металлической ванны одним из двух указанных методов, необходимо учитывать ряд критериев, оценивающих условия протекания химических реакций при взаимодействии расплава с вводимыми реагентами и кислородом окружающей атмосферы [4]. С целью получения численных значений таких критериев авторами выполнены исследования процессов массопереноса на физических моделях ковшей малой вместимости. Выбор физического моделирования как метода получения нужной информации продиктован не только стремлением минимизации временных и материальных затрат на проведение экспериментов, а и возможностью обеспечения корректности полученных сравнительных данных за счет соблюдения идентичности условий реализации изучаемых способов перемешивания (размеры моделей ковша, затраты энергии, методика

Приведены результаты физического моделирования процессов перемешивания стали в ковшах малой вместимости, позволившие разработать практические рекомендации по освоению передовых технологий внепечной обработки стали в условиях мини-металлургических предприятий, специализирующихся на производстве высококачественного металла

контроля основных параметров жидкостной системы).

Главной практической задачей при изучении движения жидкости в замкнутом объеме модели является оценка энергосиловых параметров потоков, а точнее текущих значений скоростей и давлений в наиболее характерных их областях.

Исследования проводили на лабораторных установках (рис. 1), включавших изготовленные в масштабе 1:5 объемную и плоскую прозрачную модели 20-тонного сталеразливочного ковша, а также системы контроля скорости циркуляционных потоков жидкости и времени ее гомогенизации при различных способах перемешивания.

Для фиксирования скорости жидкости, моделирующей расплав, использовали специальный зонд, снабженный тензометрическим преобразователем, включенным в измерительную схему, в состав которой входили усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и ПЭВМ [5].

Оценку времени усреднения модельной жидкости по химическому составу выполнили с помощью метода, позволявшего установить длительность процесса выравнивания в объеме модели разливочного ковша концентрации насыщенного солевого раствора, вводимого в локальную область жидкой ванны. При этом аналоговый сигнал, пропорциональный разности токов ионизации,

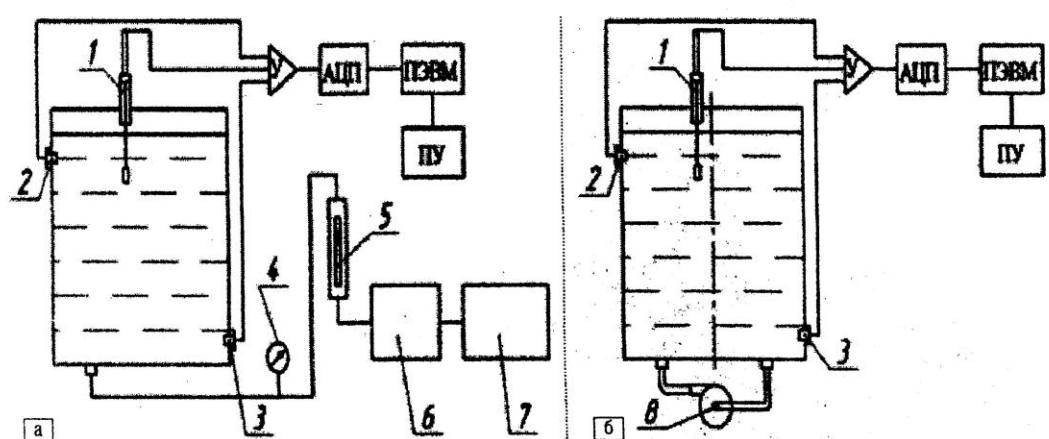


Рис. 1. Схемы лабораторных установок для моделирования донной продувки (а) и имитации электромагнитного перемешивания (б): 1 - зонд для контроля скорости потоков; 2 и 3 - датчики для контроля концентрации раствора; 4 - манометр; 5 - ротаметр; 6 - ресивер; 7 - компрессор; 8 - центробежный насос

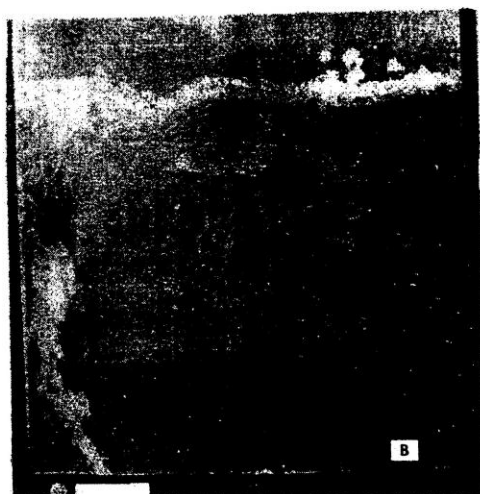
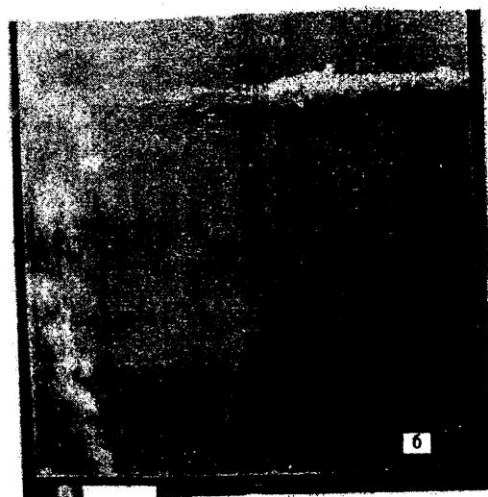
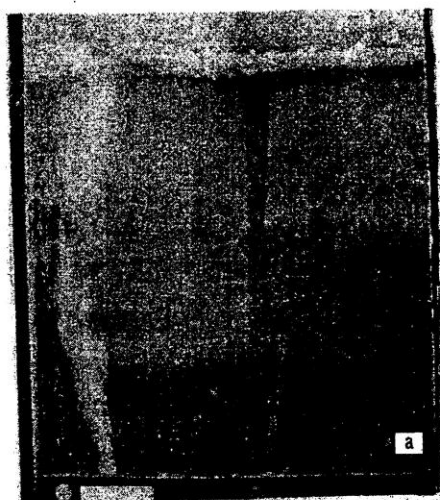


Рис. 2. Характер взаимодействия газовой струи с жидкостью при моделировании процесса продувки стали при различной удельной мощности перемешивания: а – 0,01; б – 0,02; в – 0,03 Вт/кг.

протекающих между платиновыми электродами двух датчиков, размещенных в разных точках перемешиваемой жидкой ванны и включенных в мостовую схему, после усиления и преобразования в цифровой код поступал для обработки в системный блок ЭВМ. Временной промежуток, в течение которого происходило выравнивание концентраций раствора в контрольных точках, о чем свидетельствовало уменьшение амплитуды регистрируемого сигнала до нулевого значения, характеризовал продолжительность процесса гомогенизации перемешиваемой жидкостной системы [6].

В ходе проводившихся лабораторных экспериментов имитировали продувку жидкой стали в ковше инертным газом через донную пористую пробку, а также электромагнитное перемешивание. В первом случае (рис. 1а) для возбуждения циркуляции модельной жидкости в нее через пористую пробку, вмонтированную в днище модели ковша, под избыточным давлением подавали воздух, поступающий по гибкому шлангу через ресивер от компрессора. Давление воздуха перед пробкой и его расход контролировали по показаниям манометра и ротаметра.

Во втором случае циркуляционный контур жидкостных потоков, по форме характерный для электромагнитного способа перемешивания стали в ковше, обеспечивали за счет использования центробежного насоса, всасывающий и нагнетательный патрубки которого подключали к штуцерам, винченными в днище модели ковша на равном удалении от ее боковых стенок, как показано на рис. 1б.

Для визуализации потоков жидкости во время моделирования электромагнитного способа перемешивания использовали электролиз, в результате которого образуется множество мельчайших пузырьков водорода, достаточно четко обозначающих траектории жидкостных течений.

Съемку картин жидкостных потоков в модели ковша, характерных для указанных способов перемешивания, проводили с помощью цифровой видеокамеры, установленной на штативе на некотором расстоянии от передней прозрачной стеклянной стенки модели, освещаемой двумя мощными светильниками, расположенными к ней под углом 45°.

Визуальные наблюдения и анализ снятых картинок циркуляционных потоков показали, что способ их возбуждения в модели разливочного ковша в значительной мере влияет как на характер распределения в ней зон с различной интенсивностью перемешивания, так и на режим движения имитатора расплава.

При приближении расхода вдуваемого воздуха к предельной пропускной способности пористой пробки продувка перемешиваемой жидкости происходила в струйном режиме с формированием замкнутого вихревого потока, воздействующего на газовый факел, в результате чего последний омывал участок поверхности стенки модели ковша протяженностью 0,6–0,75 глубины жидкой ванны. Одновременно с этим наблюдалось охлаждение ее свободной поверхности в зоне всплывания газовых пузырей вследствие вытеснения ими слоя материала, моделирующего конечный технологический шлак (рис. 2).

Увеличение скорости циркулирующей жидкости при имитации процесса электромагнитного воздействия на расплав способствовало зарождению и одновременному существованию отдельных вихрей, постоянно меняющих свое положение и размеры в перемешиваемой ванне (рис. 3).

Независимо от способа перемешивания, повышение скорости циркуляции модельной жидкости вызывало не только качественные, а и количественные изменения механизма ее движения. На смену ламинарному режиму, характеризующемуся неизменными во времени значениями скорости и давления, приходил турбулентный, для которого свойственны резкие колебания мгновенных значений указанных параметров. С момента наступления турбулентного режима движения скорость и давление в контролируемой

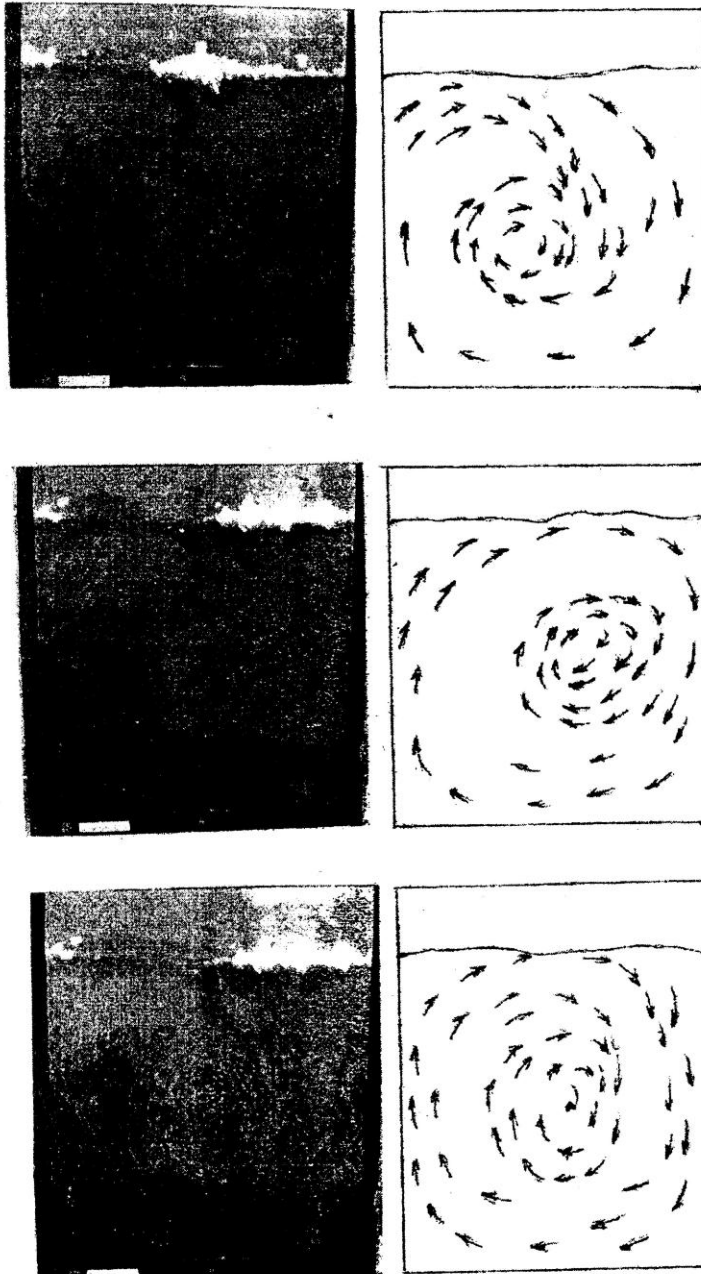


Рис. 3. Изменение во времени картины распределения циркуляционных потоков при имитации электромагнитного перемешивания.

Таблица

Интенсивность турбулентности потоков модельной жидкости при различных способах перемешивания

Схема расположения контрольных точек в ванне модели ковша	Моделируемый способ перемешивания стали	Затрачиваемая удельная мощность перемешивания, Вт/кг	Интенсивность турбулентности в контрольных точках потока, %			
			I	II	III	IV
	Продувка через донную пористую пробку	0,02	43	45	45	46
		0,03	47	48	47	47
		0,04	48	49	49	48
	Электромагнитное перемешивание	0,02	31	34	34	33
		0,03	33	35	35	34
		0,04	35	36	37	36

точке потока изменялась по случайному закону относительно среднего значения (рис. 4).

В соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [7, 8], по данным измерений значений истинной v_n и средней v_{cp} скоростей в контрольных точках циркуляционных потоков оценили интенсивность турбулентности в различных зонах жидкой ванны для моделируемых процессов перемешивания стали. При этом мгновенную пульсационную скорость Δv определили как разность $v_n - v_{cp}$, а интенсивность турбулентности I_t рассчитали из соотношения $I_t = \Delta v / v_{cp}$. Входящую в него осредненную по времени и по закону среднего квадратичного пульсацию скорости потока Δv получили по формуле

$$\Delta v = \sqrt{(\sum v_i)^2 / n}$$

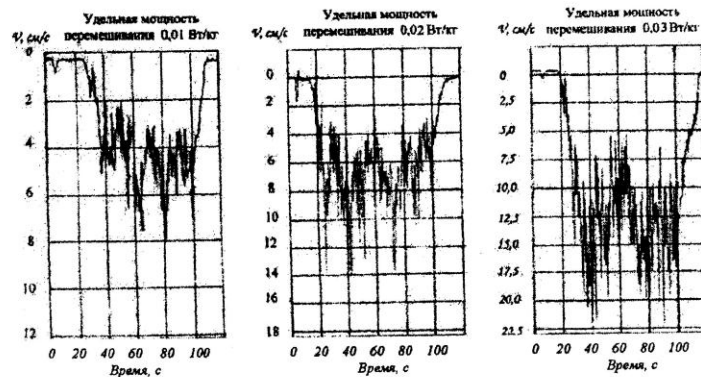
где n – число слагаемых под знаком суммы.

Зафиксированная при различной удельной мощности перемешивания интенсивность турбулентности в контрольных точках потоков, выраженная в процентах, приведена в таблице.

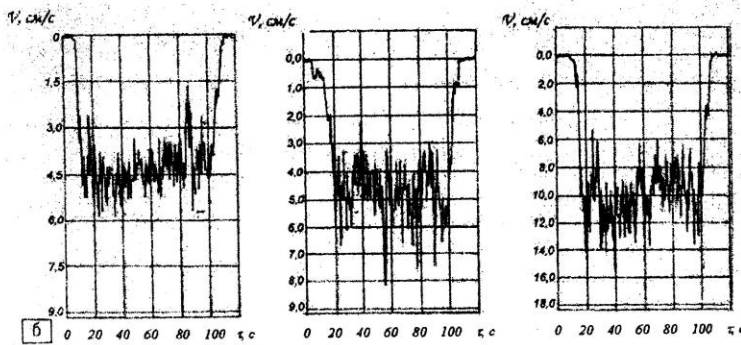
Полученная информация свидетельствует о том, что интенсивность турбулентности циркуляционных потоков жидкой ванны при моделировании процесса ее продувки в среднем превышала в 1,4 раза аналогичный показатель во время имитации электромагнитного перемешивания. Данный факт объясняется тем, что наличие двух фаз при продувке жидкости воздухом приводит к изменениям формы движения потоков вследствие решающего влияния на него взаимодействия между фазами.

Для сопоставительной оценки эффективности усреднения химического состава перемешиваемой жидкости, обеспечиваемой моделируемыми способами воздействия на расплав в процессе его внепечной обработки в разливочном ковше, осуществляли контроль времени гомогенизации жидкой ванны при различной удельной мощности, затраченной на возбуждение циркуляции потоков.

Удельную мощность (Вт/кг) газовой струи (мощность, отнесенную к массе жидкости, продуваемой в модели



а



б

Рис. 4. Характер изменения во времени скорости жидкостных потоков при различной удельной мощности перемешивания для различных способов воздействия на жидкую ванну: а – моделирование продувки, б – имитация электромагнитного перемешивания.

разливочного ковша), определили по формуле

$$\epsilon = PV/M,$$

где P – давление вдуваемого воздуха, Н/м²; V – секундный объемный расход воздуха, м³/с; M – масса перемешиваемой

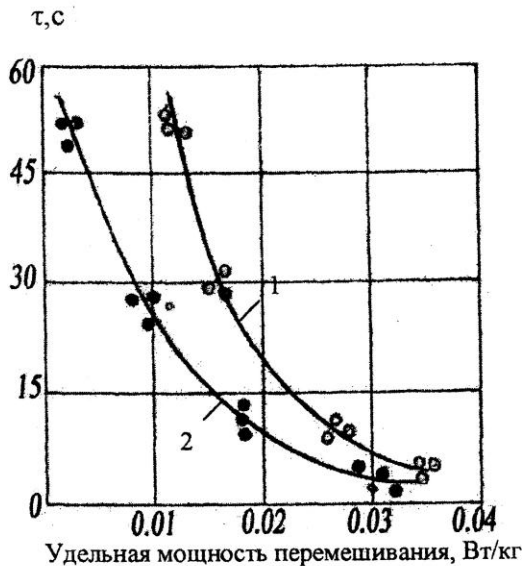


Рис. 5. Зависимость времени гомогенизации модельной жидкости от удельной мощности перемешивания: 1 – при имитации электромагнитного перемешивания; 2 – при моделировании донной продувки

жидкости в модели ковша, кг.

Во время имитации электромагнитного перемешивания удельную мощность, затрачиваемую на возбуждение циркуляции модельной жидкости, рассчитали, используя выражение

$$\epsilon = mv^2/2M,$$

где m – секундный массовый расход жидкости, перекачиваемой насосом, кг/с; v – скорость жидкости при выходе из нагнетательного патрубка, м/с.

На рис. 5 показаны графики зависимости времени гомогенизации модельной жидкости от затрачиваемой удельной мощности перемешивания изучаемыми способами. Из приведенных графиков можно сделать вывод о том, что эффективность перемешивания, обеспечиваемая обоими способами, находится в прямой зависимости от подводимой извне к жидкостной системе энергии. При этом заметная разница в продолжительности процесса гомогенизации модельной жидкости, проявляющаяся при малой удельной мощности перемешивания, практически нивелируется по мере увеличения затрат энергии на возбуждение циркуляции жидкостных потоков в ванне модели ковша. Поскольку сопоставленные способы перемешивания расплава имеют ряд специфических особенностей, обусловленных как физической сущностью самих процессов гомогенизации жидкого металла, так и конструктивным исполнением оборудования для их реализации, то окончательное решение о предпочтительности одного из них должно приниматься с учетом не только обеспечиваемой им интенсификации тепло-массопереноса в ванне разливочного ковша во время внепечной обработки, а и с понесенными при этом временными, энергетическими, материальными и трудовыми затратами [9].

Согласно литературным данным, повышенные капитальные вложения, связанные с покупкой и сооружением установки электромагнитного перемешивания, а также с внесением конструктивных изменений в корпус сталеразливочного ковша, обусловленных необходимостью встройки в него немагнитной секции, в кратчайшие сроки могут окупиться за счет более низких эксплуатационных затрат в сравнении с продувкой стали инертным газом через дорогостоящие пористые пробки, размещаемые в специальных огнеупорных блоках футеровки днища металлургической емкости [4].

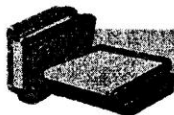
Таким образом, результаты выполненных лабораторных экспериментов, позволившие сравнить на физических моделях значения основных параметров гидродинамических процессов, протекающих в ванне сталеразливочного ковша малой вместимости при газовом и электромагнитном перемешивании расплава, свидетельствуют о целесообразности их совместного применения с учетом марочного состава выплавляемой стали и используемых способов внепечной обработки в условиях эксплуатации разливочных ковшей в составе установок по доводке металла до высоких кондиций в соответствии с сертификатом качества выпускаемой продукции.

Summary

S.P.Eronko, A.N.Smirnov, A.Yu.Zuprun, I.N.Salmash

Hydrodynamics model investigation of steel stirring processes in little capacity ladle

The physical modeling results of steel stirring processes are described. This results allowed to make the practical guidelines on high technologies development of steel out – furnace treatment for mini – metallurgical enterprises conditions.



ЛИТЕРАТУРА

1. Мини-металлургические заводы / А.Н. Смирнов, В.М. Сафонов, Л.В. Дорохова, А.Ю. Цупрун. - Донецк: НОРД-ПРЕСС, 2005. - 449 с.
2. Моделирование тепло-массообменных процессов при продувке стали в разливочных ковшах малой вместимости / С.П. Еронько, И.Н. Салмаш, Е.В. Шеган, А.Ю. Цупрун // Металл и литье Украины. - 2005. - № 3-4. - С.111-112.
3. Оптимизация работы ковшей для агрегата «печь-ковш» в условиях ДП «УБИБТ» / А.Н. Смирнов, А.Ю. Цупрун, В.А. Пимоненко и др. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія металургія. - 2002. - Вип. 40. - С.118-124.
4. Шалимов А.Г. Анализ эффективности перемещением металла в ковше на основе новых шведских разработок // Сталь. - 2004. - № 1. - С.25-30
5. Еронько С.П., Быковских С.В. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали. - К.: Техніка, 1998. - 136 с.
6. Оптимизация режима продувки жидкого металла в сталеразливочных ковшах / С.П. Еронько, А.Н. Смирнов, И.Н. Салмаш и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2004. - № 8. - С.123-126.
7. Кафаров В.В. Основы массопередачи. - М.: Высшая школа, 1979. - 439 с.
8. Маккин В.П., Донченко Э.Г. Электронные системы для автоматизированного измерения характеристик потоков жидкости и газов. - М.: Энергия, 1970. - 85 с.
9. Ресурсосбережение - основа повышения эффективности технологии внепечной обработки стали / Д.П.Кукуй, С.П.Еронько, А.Н.Смирнов и др. // Металл и литье Украины. - 2001. - № 7-9. - С.26-28.

УДК 536.777:541.123.4

С.А.Храпко, кандидат техн. наук, доцент (ДонНТУ)

Анализ и сравнение формул субрегулярных растворов для многокомпонентных систем

Общие положения.

Для вычисления термодинамических функций высоко-температурных металлургических расплавов (в частности, при расчете диаграмм состояния) широкое распространение получили различные варианты теории регулярных (ТРР) и субрегулярных растворов (ТСР). При расчете энергии смешения в многокомпонентном растворе формулы ТСР, в том числе и теории субрегулярных ионных растворов (ТСРИР, отличие состоит только в способе вычисления концентраций компонентов) обычно записывают в виде

$$G^E = \sum_{i,j=1}^n \sum_{k,l=1}^n C_{ijkl}^E + \sum_{i,j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ijk}^E = \sum_{i,j=1}^n \sum_{k=1}^n \Omega_{ij}(x_i, x_j) x_i x_j + \sum_{i,j=1}^n \sum_{k=1}^n \Omega_{ijk}(x_i, x_j, x_k) x_i x_j x_k, \quad (1)$$

где $G_{ij}^E = x_i x_j \Omega_{ij}(x_i, x_j)$ – вклад двойной системы $i-j$ в суммарную энергию смешения; $G_{ijk}^E = x_i x_j x_k \Omega_{ijk}(x_i, x_j, x_k)$ – вклад тройной системы $i-j-k$ в энергию смешения, x_i – концентрация компонента i .

Первое слагаемое – сумма двойных взаимодействий по всем бинарным системам, которые имеются в рассматриваемой многокомпонентной системе, второе слагаемое – то же самое, но для тройных систем. При необходимости, аналогичным образом можно учесть взаимодействия и в системах более высокого порядка (четверные системы и выше). Функции Ω_{ij} и Ω_{ijk} – по сути, это теплоты смешения, как в ТРР, но с

Рассмотрены различные варианты формул теории субрегулярных растворов для многокомпонентных систем. Рассчитаны значения коэффициентов для рассмотренных формул. Показано, что корректный выбор вида формул позволяет более обоснованно использовать их в трех- и многокомпонентных системах, особенно по которым нет (или имеется ограниченное количество) экспериментальных данных

концентрационной зависимостью.

Рассмотрим вклады бинарных систем. В литературе предложены различные варианты формул для вычисления вклада каждой бинарной системы в суммарную энергию смешения (для упрощения индексы коэффициентов бинарных систем опущены). Например, рассмотрим 3-х параметрические формулы авторов Г.Г.Михайлов (ТСРИР) [1]:

$$\Omega_{ij} = Ax_i^2 + Bx_i x_j + Cx_j^2, \quad (2)$$

К.Люпис ([3], с. 252-255):

$$\Omega_{ij} = \alpha x_i + b x_i x_j + c x_j, \quad (3)$$

Аналог формулы Келлога [3]:

$$\Omega_{ij} = D + E(x_i - x_j) + F(x_i - x_j)^2, \quad (4)$$

Т.Г.Сабирзянов [5]:

$$\Omega_{ij} = dx_i + e + fx_j, \quad (5)$$

Предлагаемый в данной работе вариант формулы ТСР:

$$\Omega_{ij} = Mx_i^2 + N + Px_j^2. \quad (6)$$

Пересчет параметров бинарных систем из одной модели в другую.

Рассмотрим чистую двойную систему $i-j$, в которой