

УДК 621.74:621.313:658.382:538.4

**В. И. Дубоделов, В. А. Середенко, В. Н. Фикссен,  
В. К. Погорский, А. О. Горшков, А. А. Паренюк,  
М. С. Горюк, А. В. Ященко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, НАПОРНЫХ И РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА ДВУХЗОННОЙ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ЕГО ИСПЫТАНИЯХ С ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ**

*В результате проведения горячих испытаний макета двухзонной магнитодинамической установки установлены ее электрические, напорные и расходные характеристики, определены их особенности и отличия от соответствующих характеристик серийной установки МДН-6А. Сравнительный анализ показал, что на макете двухзонной магнитодинамической установки возможна реализация напора более 2 м алюминиевого расплава (50 кПа) и повышение расхода металла в 1,5 раза.*

**Ключевые слова:** магнитодинамическая установка, двухзонный макет, горячие испытания, характеристики, алюминиевый сплав.

*В результаті проведення гарячих випробувань макета двозонної магнітодинамічної установки встановлено її електричні, напірні та витратні характеристики, визначено їх особливості і відмінності від відповідних характеристик серийної установки МДН-6А. Порівняльний аналіз показав, що на макеті двозонної магнітодинамічної установки можлива реалізація напору більше 2 м алюмінієвого розплаву (50 кПа) та підвищення витрати металу в 1,5 рази.*

**Ключові слова:** магнітодинамічна установка, двозонний макет, гарячі випробування, характеристики, алюмінієвий сплав.

*As a result of hot tests of two-zone model of magnetodynamic installation, there were set its power, pressure and mass flow characteristics, defined features and differences from those ones of serial installation MDN-6A type. Comparative analysis has showed that two-zone model of magnetodynamic installation is possible to realize the pressure over 2 m of aluminum melt (50 kPa) and increasing of metal mass flow rate up to 1.5 times.*

**Keywords:** magnetodynamic installation, two-zone model, hot tests, characteristics, aluminum alloy.

**П**ри проведении горячих испытаний макета модернизированной экспериментальной двухзонной магнитодинамической установки (МДУ), созданного с целью проверки возможности повышения напорно-расходных характеристик магнитоди-

## Получение и обработка расплавов

намического оборудования типа МДН-6А на жидком алюминиевом сплаве, основывались на опыте организации подобных исследований на серийных установках МДН-6А [1, 2] и результатах холостых испытаний физической модели новой МДУ.

Процесс горячих испытаний начинали с нагрева канала и тигля макета двухзонной магнитодинамической установки с помощью нихромового нагревателя (диаметр проволоки 6 мм), подключенного к трансформатору индуктора МДН-6А. Для этого использовали стандартную методику, применявшуюся ранее при запуске установки МДН-6А [1, 2]. Нагрев проводили в течение 39 часов. При этом нагреватель подключали к трансформатору первого индуктора, включенного на 220 В. Нагрев осуществляли в ступенчатом режиме за счет переключения ступеней трансформатора. Время выдержки на I ступени – 12 ч (электроток в нагревателе 60 А), на II – 12 ч при токе 90 А, на III – 6 ч (ток 100 А), на IV – 6 ч (ток 120 А), на V – 3 ч (ток 150 А). Температура на завершающей стадии нагрева нагревателя достигала 610 °С.



Рис. 1 Заливка жидкого металла из ковша в тигель макета двухзонной магнитодинамической установки

Параллельно процессу нагрева футеровки макета магнитодинамической установки производили плавку 110 кг алюминиевого сплава марки А5М2 в печи сопротивления типа САТ с тиглем из SiC, а после расплавления металл нагревали до 780 °С. По завершении нагрева футеровки нихромовый нагреватель извлекали из тигля и канала макета, а расплавленный алюминиевый сплав переливали из тигля печи САТ в заливочный ковш емкостью 20 кг расплава. Жидкий металл из такого ковша в тигель макета двухзонной магнитодинамической установки заливали через центральный канал его канальной системы (рис. 1). В три приема в макет установки было залито 60 кг расплава. Температура жидкого алюминия в тигле макета двухзонной магнитодинамической установки после заливки указанной дозы снизилась до 610 °С.

В конце заполнения канальной системы макета первый и второй индукторы, подсоединенные соответственно к фазам АВ и АС (перекосный режим [2]), включали на первую ступень трансформатора (напряжение 45 В, токи в индукторах составляли соответственно 220 и 230 А). После подогрева жидкого металла в макете установки до 700 °С производили доливку жидкого сплава из печи САТ в тигель макета двухзонной МДУ до общей массы 85 кг. При этом температура расплава снижалась до 622 °С. Затем индукторы переключали на вторые ступени (напряжение 50 В, токи в индукторах соответственно 240 и 250 А). Через 10 мин индукторы включали на третьи ступени (напряжение 56 В, величины токов, протекавших в индукторах, были соответственно 282 и 290 А). Спустя 10 мин индукторы переключали на четвертые ступени (напряжение 62 В, при токах в индукторах соответственно 340 и 355 А), а затем на пятые ступени при напряжении 75 В и токах в индукторах 420 и 480 А. В результате жидкий алюминиевый сплав был нагрет до 750 °С.

По завершении процесса перегрева металла индукторы снова были переключены на первую ступень, а после этого был дополнительно включен на первую ступень (напряжение 23 В, ток в катушках 110 А) электромагнит. Было установлено, что при включении электромагнитных систем макета в режим перекоса, жидкий металл в его тигле под действием электромагнитных сил перекачивался через рабочие зоны и над одним из боковых каналов формировался фонтан расплава.

## Получение и обработка расплавов

На следующем этапе горячих испытаний оба индуктора были подсоединены на фазу АВ (режим насоса [2]), и при включении электромагнита фонтан расплава возник уже над центральным каналом.

В таком режиме были изучены электрические характеристики П-образного электромагнита (с четырьмя катушками) макета двухзонной магнитодинамической установки. В результате определено, что коэффициент мощности ( $\cos \phi$ ) электромагнита равен 0,12, что аналогично значению  $\cos \phi$  электромагнита серийной МДН-6А.

Исследование расходных характеристик макета двухзонной МДУ проводили с применением стандартных цилиндрических металлопроводов, используемых для заливки малых и средних доз жидкого алюминия. Их особенностью является наличие дросселя в концевике металлопровода, который стыкуется с центральным каналом макета. Диаметр дросселя 10 мм, длина – 30 мм, внутренний диаметр металлопровода 30 мм. Дроссель является добавочным гидравлическим сопротивлением для потока металла и снижает как пульсационную составляющую скорости металла, так и значение расхода.

Изучение расходных характеристик проводили по стандартной методике, включающей заполнение мерного ковша расплавом, поступающим из металлопровода, при фиксации времени заполнения и массы расплава в ковше (рис. 2). Результаты исследований расходных характеристик при разном перепаде уровней слива из металлопровода и металла в тигле представлены на рис. 3.



Рис. 2. Заполнение мерного ковша расплавом из металлопровода при определении расходных характеристик

В исследованном диапазоне расходов металла при различных электрических нагрузках на индукторах и электромагните согласно данным рис. 3, зависимость расхода от напряжений, на катушках индукторов и электромагнита, близка к линейной. Увеличение расхода металла прямо пропорционально росту напряжения на катушках электромагнита, а влияние напряжения на катушках индукторов имеет более сложную зависимость, особенно при повышении уровня слива. Определено, что с увеличением перепада между уровнями слива металла из носка металлопровода и уровнем расплава в тигле на 120 мм, градиент роста расхода, согласно данным рис. 3, снижается с 0,022 до 0,009 (кг/с)/В.

Оценку диапазонов расхода металла при средних электрических нагрузках на индукторах в случае перепада уровней слива и металла в тигле – 220 мм проводили при величинах напряжения на катушке П-образного электромагнита макета двухзонной магнитодинамической установки, характерного для катушки С-образного электромагнита серийной МДН-6А. Основываясь на данных рис. 3, была получена

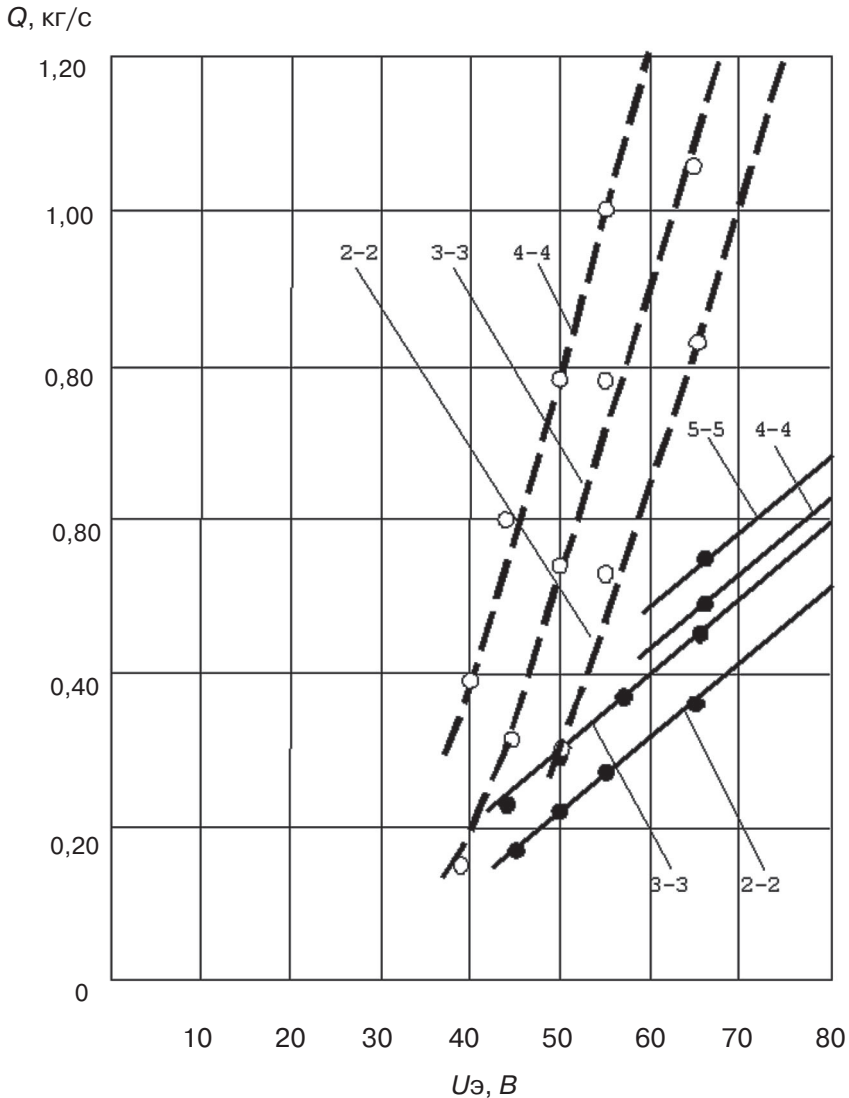


Рис. 3. Расходные характеристики макета двухзонной магнитодинамической установки (цифры у линий графика – ступени трансформаторов, на которые включены индукторы): ○ – перепад уровней слива из металлопровода и металла в тигле 220 мм; ● – перепад уровней слива из металлопровода и металла в тигле 340 мм

зависимость, показанная на рис. 4. Согласно прогнозным линиям, максимальное напряжение на одной катушке П-образного электромагнита (40 В) может обеспечить расход металла, равный 4,2 кг/с при включении индукторов на вторые ступени и 5,4 кг/с – на четвертые.

Влияние напряжения на индукторах на уровень расплава в металлопроводе (Н) изучено при обесточенных катушках электромагнита для П-образного электромагнита макета двухзонной магнитодинамической установки в сравнении с С-образным электромагнитом серийной МДН-6А (рис. 5). Как видно из рис. 5 действие индукторов сравниваемых магнитодинамических установок на уровень металла кардинально отличается. В макете двухзонной МДУ уровень металла повышается, а в серийной МДН-6А – понижается. Снижение уровня металла в МДН-6А при максимальном напряжении на индукторах по величине в 6,1 раза превышает подъем уровня в металлопроводе макета двухзонной МДУ. Абсолютная величина разницы уровней достигает почти 0,5 м. Обе зависимости изменения уровней имеют слож-

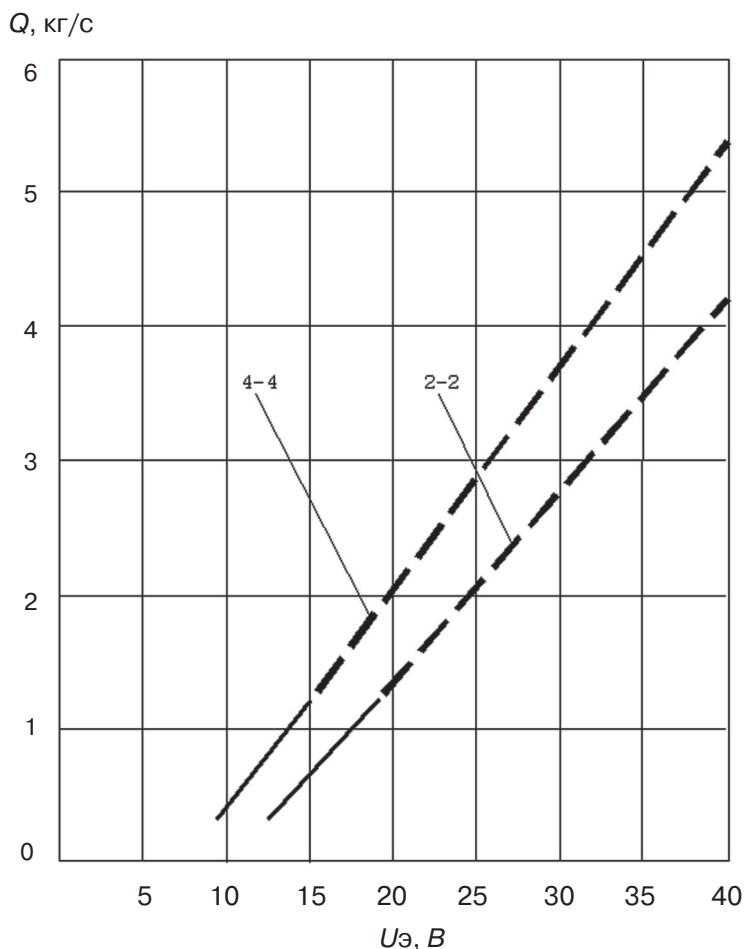


Рис. 4. Расходные характеристики макета двухзонной магнитодинамической установки (цифры у линий графика – степени трансформаторов, на которые включены индукторы) при перепаде уровней слива из металлопровода и металла в тигле 220 мм, приведенные к напряжению на одной катушке электромагнита:

— экспериментальная зависимость; — — — — — прогнозная линия

ную форму и характеризуются наличием зеркально схожих изгибов в диапазоне напряжений на индукторах 45-55 В.

Магнитодинамическим установкам, которые относятся к разновидностям индукционных канальных печей, свойственны электродинамические явления, вызываемые взаимодействием магнитного поля рассеивания индуктора с электрическим током в канале (движущий эффект) [2, 3]. В результате действия этого эффекта, возникающие электродинамические усилия направлены радиально и создают в металле канала повышенное давление вблизи его наружной стенки и пониженное у внутренней [3]. Наличие в серийной установке типа МДН-6А С-образного электромагнита, охватывающего тройниковую зону, вследствие эффекта искажения магнитного поля электрического тока, протекающего в канале вблизи массивного стального металлопровода с большой магнитной проницаемостью, и притяжения к нему проводника с током [4] приводит к всасыванию жидкого металла из центрального канала в боковые [2] (рис. 6, а). Симметричное расположение П-образного электромагнита относительно индукторов в макете двухзонной установки значительно ослабляет указанную индуктивную связь [5]. Это обуславливает отсутствие эффекта всасывания в макете

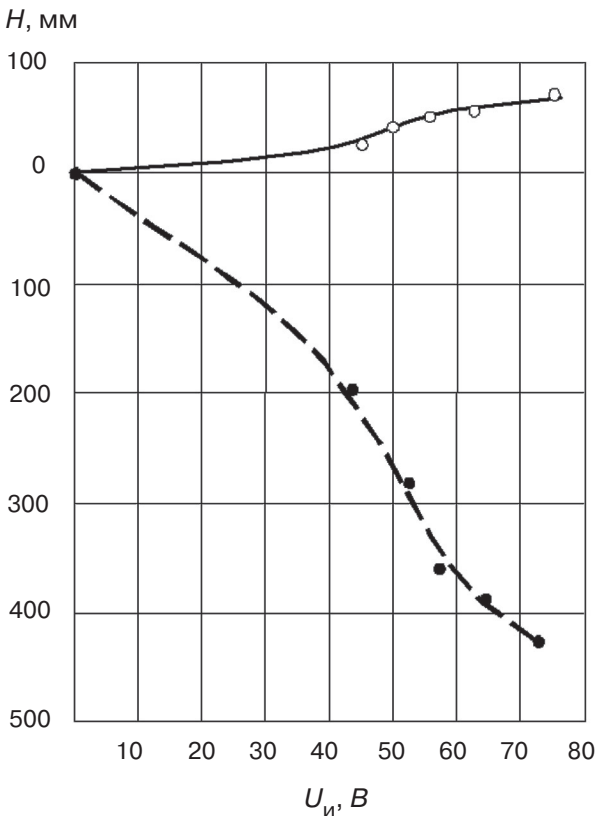


Рис. 5. Зависимость уровня металла в металлопроводе от напряжения на катушках индукторов: — — — макета двухзонной магнитодинамической установки; — — — — — МДН-6А

напряжению на катушки электромагнита перед выдачей доз металла. Кроме того,

двухзонной МДУ. Проявление движущего эффекта пропорционально величине размера канала в плоскости, перпендикулярной к оси катушки индуктора. Небольшой напор в металлопроводе макета двухзонной МДУ связан с существенно большим размером крестообразной рабочей зоны в сравнении с тройниковой (рис. 6, б).

В результате проведения экспериментов получена напорная характеристика макета двухзонной МДУ, четыре катушки которого питались от трансформатора серийной установки МДН-6А, рассчитанного на нагрузку аналогичных двух катушек электромагнита. С учетом этого на рис. 7 показаны напорные характеристики макета двухзонной магнитодинамической установки и серийной МДН-6А, приведенные к напряжению на одной катушке.

Как видно из рис. 7, стартовое преимущество двухзонной МДУ по начальному напору заключается в отсутствии необходимости создания специальной электрической схемы управления индукторами, которая компенсирует снижение уровня расплава в металлопроводе за счет подачи дополнительного

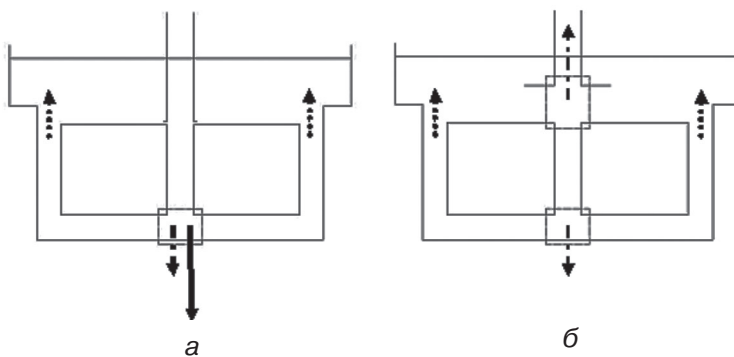


Рис. 6. Силы, действующие в рабочих зонах и каналах магнитодинамических установок МДН-6А (а) и макете двухзонной (б) при включенных индукторах и отключенных от электропитания электромагнитах: — — — сила от эффекта взаимодействия электрического тока в канале с индуцированным им магнитным полем С-образного электромагнита, охватывающего канал; ···· сила от электровихревого эффекта в боковых устьях канала; - - - сила действия движущего эффекта в рабочих зонах



для этого необходимы затраты электроэнергии для создания напряжений до 10 В (рис. 7), сравнивающие уровни расплава в металлопроводе и тигле. В макете двухзонной магнитодинамической установки такие затраты отсутствуют, так как подъем уровня расплава в металлопроводе от действия индукторов незначителен (2-7 см) по сравнению с серийной установкой МДН-6А, где снижение уровня составляет 20-43 см и не оказывает заметного влияния на процесс выдачи расплава из металлопровода.

Нелинейность начального участка напорных характеристик макета двухзонной МДУ по сравнению с линейной зависимостью этих характеристик серийной МДН-6А, вероятно, связана со спецификой создания электромагнитного давления в верхней крестообразной зоне и характером МГД-потокосов на боковых границах этой зоны. Вследствие большей высоты крестообразной зоны по сравнению с нижней Т-образной такой же, как в серийной МДН-6А, зона растекания электрического тока в ней больше. Это снижает плотность электрического тока, создаваемого индукторами по сравнению с нижней Т-образной зоной. Повышение напряжения на катушках электромагнита ведет к росту индукции не только в центре крестообразной рабочей зоны, но и на ее периферии (вверху, внизу и по бокам). Это расширяет область создания повышенных электромагнитных сил и их интегральное действие на металл. С одной стороны возрастает электромагнитная сила, направленная вверх, а с другой – повышается устойчивость МГД-вихрей на боковых границах крестообразной рабочей зоны, выполняющих роль твердых стенок [2]. В результате снижается возможность транзитной перекачки металла по каналной системе макета двухзонной МДУ. Переход крестообразной зоны в подобный режим функционирования определяет совместно с нижней Т-образной зоной линейный рост напора.

В результате проведения горячих испытаний макета двухзонной магнитодинамической установки установлены ее электрические, напорные и расходные характеристики, определены их особенности и отличия от соответствующих характеристик традиционной установки МДН-6А. Для реализации потенциальных возможностей повышения напорных и расходных характеристик двухзонной МДУ прежде всего необходимо повысить мощность трансформатора, питающего катушки электромагнита, как минимум вдвое (до 40 В на одну катушку), скорректировать геометрию каналной системы для сбалансирования ее активного и индуктивного сопротивлений, а так же для снижения гидравлического сопротивления этой системы. Полученные результаты показали, что по сравнению с серийной МДН-6А на макете

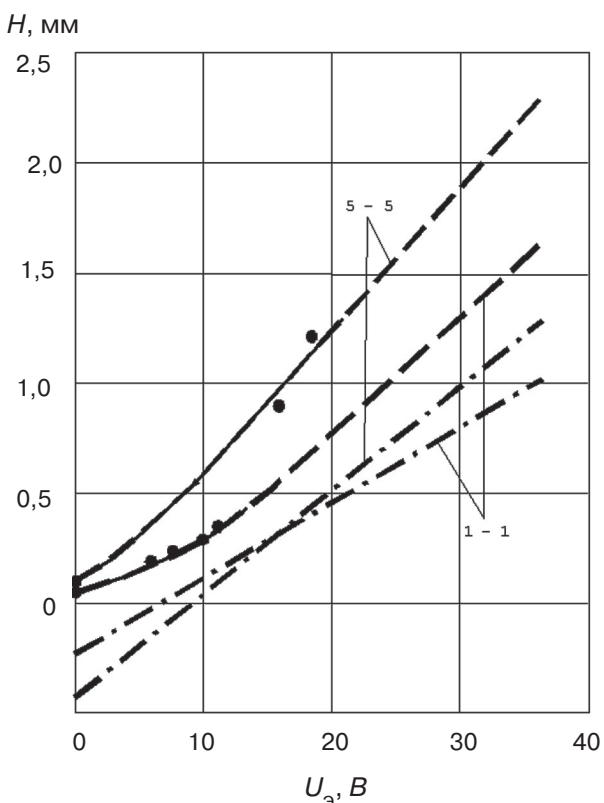


Рис. 7. Зависимость напора металла (уровня в металлопроводе  $H$ ), приведенная к напряжению на одной катушке электромагнита (цифры у линий графика – ступени трансформаторов, на которые включены индукторы): — экспериментальная зависимость; — — — прогнозная линия для макета двухзонной магнитодинамической установки; — · — МДН-6А

двухзонной магнитодинамической установки возможна реализация напора более 2 м (50 кПа) и повышение расхода металла (при исследованных средних нагрузках на катушках электромагнита и наличии дросселя в наконечнике металлопровода до 1,5 раза).



### Список литературы

1. Трефняк В. А., Полищук В. П., Яковлев В. С и др. Исследование тепловых режимов основных узлов заливочной установки МДН-6 в период разогрева // МГД в металлургии и литейном производстве. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1972. – С. 106-108.
2. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: «Наукова думка», 1989. – 256 с.
3. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. – М.: Metallurgizdat, 1958. – 704 с.
4. Арефьев А. В., Алешин А. С. Исследование транзитного течения металла в сдвоенной индукционной единице (СИЕ) с дополнительным магнитопроводом // Тезисы докладов 12 Рижского совещания по магнитной гидродинамике. – Саласпилс: ИФ АН Латв.ССР, 1987. – Ч.2. – С. 191-195.
5. Дубоделов В. И., Середенко В. А., Фикссен В. Н. и др. Возможность повышения электромагнитного давления в двухзонных магнитодинамических установках для литья алюминиевых сплавов// Процессы литья. – 2016. – № 5. – С. 41-47.



### References

1. Trefnyak V. A., Polishchuk V. P., Yakovlev V. S. et al. (1972) Issledovanie teplovykh rezhimov osnovnykh uzlov zalivochnoy ustanovki MDN-6 v period razogreva [*The study of thermal conditions of the main components of the casting installation MDN-6 in the heating period*]. MGD v metallurgii i liteynom proizvodstve, Kiev: IPL AN USSR, pp.106-108. [in Russian].
2. Polishchuk V. P., Tsyn M. R, Horn R. K. et al. (1989) Magnitodynamicheskie nasosy dlya zhidkikh metallov [*Magnetodynamic pumps for liquid metals*]. Kiev: Naukova dumka. [in Russian].
3. Farbman S. A., Kolobnev I. F. (1958) Induktsionnye pechi dlya plavki metallov i spлавov [*Induction furnace for melting of metals and alloys*]. Moscow: Metallurgizdat. [in Russian].
4. Arefev A. V., Aleshin A. S. (1987) Issledovanie tranzitnogo techeniya metalla v sdvoennoy induktsionnoy edinitse (SIE) s dopolnitelnym magnitoprovodom [*The study of transit metal flow in a dual induction unit with an additional magnetic circuit*]. Tezisy dokladov 12 Rihzskogo soveshchaniya po magnitnoy gidrodinamike Ch. 2. Salaspils: IF AN Latv. SSR, pp. 191-195. [in Russian].
5. Dubodelov V. I., Seredenko V. A., Fikssen V. N. et al. (2016) Vozmozhnost povysheniya elektromagnitnogo davleniya v dvukhzonnykh magnitodinamicheskikh ustanovkakh dlya litya alyuminievyykh spлавov [*The ability to increase the pressure in the two-band electromagnetic magnetodynamic plants for casting of aluminum alloys*]. Protsessy litya, no. 5, pp.41-47. [in Russian].

Поступила 06.12.2016