

УДК 669.412: 621.047

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗЛИВКИ В ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ

*Гуцин В.Н., д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии  
и оборудование» (guschinvn@rambler.ru)*

*Коровин В.А., д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии и оборудование»*

*Беляев С.В., к.т.н., доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование»*

*Демченко А.И., аспирант кафедры «Металлургические технологии и оборудование»*

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
(603022, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы, связанные с эффективностью процессов фильтрации металлических расплавов в зависимости от размеров неметаллических включений, параметров пенокерамических фильтров и вариантов их расположения. Исследования влияния основных конструктивных элементов на процессы фильтрации никелевых расплавов в процессе разлива в вакуумно-индукционной установке проводились на низкотемпературных физических моделях. Моделирование процессов фильтрации расплавов основано на гидродинамическом подобии процессов движения потоков расплава и неметаллических включений в разливочных емкостях. Разработана методика моделирования, определены масштабы и изготовлена модельная установка. Рассмотрено влияние схемы расположения фильтрационных и разделительных перегородок на динамику потоков металла, неметаллических включений и эффективность фильтрации. Эффективность процесса фильтрации никелевых расплавов рассмотрена в зависимости как от технических параметров самого фильтра (эффективной поверхности фильтрации, толщины фильтра, размеров каналов, количества каналов на единицу площади), а так и от типа и размеров неметаллических включений, особенностей конструкции разливочного устройства и схемы расположения фильтра. Установлено, что на общую эффективность фильтрации оказывает влияние скорость и равномерность распределения потоков расплава перед фильтром. Для обеспечения равномерного распределения скоростей потоков расплава перед фильтром устанавливается разделительная перегородка с перепускными отверстиями, расположение которых и их число также являлось предметом исследования. В результате проведенных исследований установлены зависимости между эффективностью фильтрации, размерами и видом неметаллических включений при использовании вертикальных и горизонтальных пенокерамических фильтров в процессе разлива никелевых расплавов в промежуточные разливочные емкости вакуумно-индукционной установки. Определено, что при вертикальном расположении фильтра эффективность его работы выше, чем при горизонтальном. Дополнительным средством повышения эффективности работы фильтрационной системы является использование разделительной перегородки. Определено оптимальное количество отверстий и расположение перегородки в разливочной емкости, обеспечивающие равномерное распределение потоков расплава по высоте перед фильтром и увеличение времени его работы.

**Ключевые слова:** фильтры, физическое моделирование, гидродинамика потоков расплава, неметаллические включения, эффективность фильтрации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-428-435

### ВВЕДЕНИЕ

Повышенные требования к качеству литых заготовок из жаропрочных никелевых сплавов, применяемых в авиационной промышленности [1 – 3], приводят к необходимости разработки мероприятий как во время их вакуумно-индукционного переплава, так и в процессе разлива, обеспечивающих снижение содержания неметаллических включений (НВ).

В настоящее время в процессе разлива для очистки расплавов от неметаллических включений (оксидов, нитридов, сульфидов и др.) широко используются фильтрующие элементы [4 – 7].

Для фильтрационного рафинирования металлических расплавов от неметаллических включений луч-

шим образом себя зарекомендовали пенокерамические фильтры (ПКФ), обладающие комплексом преимуществ в сравнении с аналогами [8]. Пенокерамический фильтр характеризуется высокой открытой пористостью и развитой поверхностью. Такая структура фильтра позволяет эффективно задерживать НВ в фильтруемом металле при условии смачивания расплавом поверхности пенокерамического фильтра. Для повышения адгезии НВ и стойкости поверхности материал ПКФ дополнительно проводили модифицирование его поверхности.

Как следует из работы [8], применение ПКФ позволяет очистить металл от НВ, а также добиться равномерного их распределения по объему металла, что, по мнению авторов, является причиной существенного роста комплекса механических свойств.

Однако остаются не решенными вопросы, связанные с рациональным расположением фильтра в разливочной емкости, возможностью использования дополнительных устройств для стабилизации процесса разлива, их влияния на эффективность процесса фильтрации и ресурс работы фильтра.

Существующие методы расчета эффективности процесса фильтрации ограничиваются техническими параметрами самого фильтра: эффективной поверхностью фильтрации, толщиной фильтра, размерами каналов (диаметром, протяженностью, их расположением) и количеством каналов на единицу площади [9 – 12].

Процесс фильтрации является многофакторным, на который оказывают влияние гидродинамика разлива, молекулярная диффузия, силы поверхностного натяжения на границе раздела фаз в гетерогенной среде, включающей расплав, газовые включения, жидкие и твердые НВ [13 – 15]. Поэтому использование расчетных численных методов затруднительно из-за необходимости решения системы уравнений, в том числе нелинейной, и неоднозначности задания граничных условий.

Оценка эффективности фильтрации при использовании различных технических решений обычно сводится к металлографическому исследованию состава и количества НВ в литом металле [16 – 18], что является трудоемким и затратным способом.

В случае сложности получения достоверной математической модели явления или процесса для решения ряда конкретных технологических задач можно воспользоваться методом физического моделирования, основанного на теории подобия [19 – 20], который в настоящее время успешно используется для проектирования разливочных устройств МНЛЗ.

Целью данной работы являлась разработка на основе теории физического моделирования методики исследования процессов фильтрации металлических расплавов с учетом динамики потоков металла и НВ, геометрии разливочного устройства, схемы расположения фильтрационных перегородок, а также определение эффективности фильтрации никелевых расплавов в процессе разлива в вакуумно-индукционной установке.

Объектом исследований был выбран жаропрочный сплав ЭП-648-ВИ, выплавляемый на ПАО «Русполимет». Данный сплав используется для изготовления деталей авиационной техники (диски, лопатки газовых турбин).

Выплавка производилась в вакуумно-индукционной печи ВИП-3,0 емкостью 3 т. В стандартном исполнении разливка осуществлялась через специальное разливочное устройство – промежуточный ковш, изготовленный из керамики. Для стабилизации процесса фильтрации перед пеночерамическим фильтром устанавливалась керамическая перегородка с последо-

вательностью круглых отверстий определенного диаметра.

Керамическая перегородка, обладающая высокой конструкционной прочностью, предназначена для снижения кинетической энергии струи расплава и разделения ее на множество мелких струй, что препятствует эрозии и разрушению пеночерамического фильтра и позволяет создать равномерное ламинарное течение расплава относительно поверхности фильтра.

В задачи исследований входило так же определение оптимального расположения ПКФ и перегородки, количество и расположение отверстий.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика моделирования процессов фильтрации расплавов основана на критериальном подоби моделируемых и модельных систем, которое устанавливается из системы уравнений, приведенных к безразмерному виду, описывающих данный процесс, и критериальной зависимости для моделирования гидродинамики потока расплава [19].

Для моделирования гидродинамики потока расплава эту систему уравнений при условии сохранения сплошности моделируемой среды можно записать в следующем виде:

$$W \nabla \theta = Ne \nabla^2 \theta; \quad (1)$$

$$W \nabla W = \frac{1}{Ne} \Delta f^n + \left( \frac{Ne}{Fr} Re \right) \theta - \nabla P_k + \frac{1}{Re} \nabla^2 W; \quad (2)$$

$$W_k = f(Fr, Ne, Re, X, Y), \quad (3)$$

где  $Re = \frac{\omega X_o}{\nu}$ ,  $Fr = \frac{\omega^2}{g X_o}$ ,  $Ne = \frac{X_o}{\omega \tau}$  – числа подобия Рейнольдса, Фруда и Ньютона соответственно;  $X_o$ ,  $X = \frac{x}{X_o}$

и  $Y = \frac{y}{Y_o}$  – характерный размер разливочной емкости и безразмерные координаты соответственно;  $\rho$  – плотность среды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\nu_o$ ,  $\nu_m$  – кинематическая вязкость расплава и модельной жидкости;  $W = \frac{\omega}{\omega_j}$ ,  $W_x = \frac{\omega_x}{\omega_j}$  и  $W_y = \frac{\omega_y}{\omega_j}$  – безразмерная скорость потока и ее проекции на оси  $x$  и  $y$  соответственно;  $\omega$  и  $\omega_j$  – скорости в исследуемой точке и на выходе из выходного отверстия разливочной емкости соответственно;  $\theta = \frac{t}{t_{фр}}$  – безразмерная температура расплава;

$t$ ,  $t_{фр}$  – температуры в исследуемой точке и на фронте затвердевания соответственно;  $P = \frac{P}{P_j}$  – относительное давление потока расплава;  $p$ ,  $p_j$  – давление в данной точке и динамическое давление на выходе из отверстия разливочного стакана соответственно.

В уравнении (2)  $f''$  является функцией, определяющей поверхность раздела фаз. В данном случае это площадь поверхности раздела жидкой и твердой (фильтра или стенки разливочной емкости) сред.

Исходя из этих зависимостей и выбранного геометрического масштаба для жидкой ванны  $M_x = \frac{(X_o)_o}{(X_o)_m}$ ,

при заданных граничных условиях [19] получаем:

– масштаб скоростей (при  $Re \cdot Fr = idem$ )

$$M_\omega = \sqrt[3]{\frac{v_o}{v_m}}; \quad (4)$$

– масштаб вязкостей жидкостей ( $Re = idem$ )

$$M_v = \frac{(X_o)_o \omega_o}{(X_o)_m \omega_m} = M_x M_\omega = M_x^{1,5}; \quad (5)$$

– масштаб расхода ( $Re \cdot Fr, X, Y = idem$ )

$$M_Q = M_\omega M_x^2; \quad (6)$$

– масштаб времени ( $Ne = idem$ )

$$M_\tau = \frac{(X_o)_m \omega_o}{(X_o)_o \omega_m} = \frac{M_\omega}{M_x}, \quad (7)$$

где индекс «м» принадлежит параметру на модели; «о» – на оригинале.

При изучении поведения неметаллических включений в расплаве необходимо учитывать величину фазовых границ (функция  $f''$ ), свободное движение частиц и вязкость двухфазного потока. Это позволяет определить масштабы моделирования для включений и подобрать материалы для их имитации при выбранных масштабах жидкой ванны.

Ниже приведены характеристики НВ для расплавов и имитирующих их модельных примесных образований.

Плотности неметаллических включений в расплаве:

Неметаллические включения	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
SiO <sub>2</sub>	2300
FeO·SiO <sub>2</sub>	3000
MnO·SiO <sub>2</sub>	3600
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3900
MnS	4000
2MnO·SiO <sub>2</sub>	4100
2FeO·SO <sub>2</sub>	4300
FeS	4600
MnO	5500
FeO	5900

Плотности модельных примесных образований:

Примесные образования	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Пробка	220 – 260
Пенопласт (К-40)	200 – 240
Уголь сосновый	280 – 440
Уголь дубовый	570
Сосна	370 – 600
Осина	500
Тополь	350 – 500
Полипропилен	900 – 920
Графит	900 – 950
Полистирол	1050 – 1070

В случае изучения поведения твердых и жидких примесных образований в условиях конвекции потоков расплава и учета подъемной силы уравнения (2) и (3) принимают вид:

$$W \nabla W = \left( \frac{1}{Ne^2} Ar \right) f'' + \left( \frac{Ne}{Fr} Re \right) \theta - \nabla P_k + \frac{1}{Re} \nabla^2 W; \quad (8)$$

$$W = f(Fr, Ne, Re, Ar, X, Y), \quad (9)$$

где  $Ar = \frac{g X_o^3 (\rho_v - \rho_j)}{\rho_j v^2}$  – число подобия Архимеда; ин-

дексы «в» и «ж» принадлежат к включению и расплаву соответственно;  $v$  – кинематическая вязкость расплава.

На основании идентичности чисел подобия  $Ar = idem$ , т. е. из идентичности условия свободного движения этих примесных образований на модели и оригинале, определяем их геометрический масштаб:

$$M_{пр,x} = \sqrt[3]{\frac{v_o^2 \rho_{ж,o} (\rho_v - \rho_{ж})_m}{v_m^2 \rho_{ж,m} (\rho_v - \rho_{ж})_o}}. \quad (10)$$

При проектировании модельной установки линейный масштаб выбирался равным  $M_x = 1,6$ .

Получены следующие расчетные значения масштабов моделирования:

– скоростей потоков расплава  $M_w = 1,27$ ;

– расхода расплава  $M_v = 3,24$ ;

– времени  $M_t = 1,26$ ;

– размера НВ  $M_{хв} = 1,37$ .

На рис. 1 приведена схема модельной установки для исследования процессов динамики расплава и его фильтрации.

Для исследования динамики НВ осуществлялась подача 20 г навески, имитирующей примесные образования, в струю подводимой в промежуточный ковш модельной среды (воды). Опыты проводились с предварительным рассевом НВ по фракциям и вводом общей массы навески в течение общего времени ее нахождения во взвешенном состоянии.

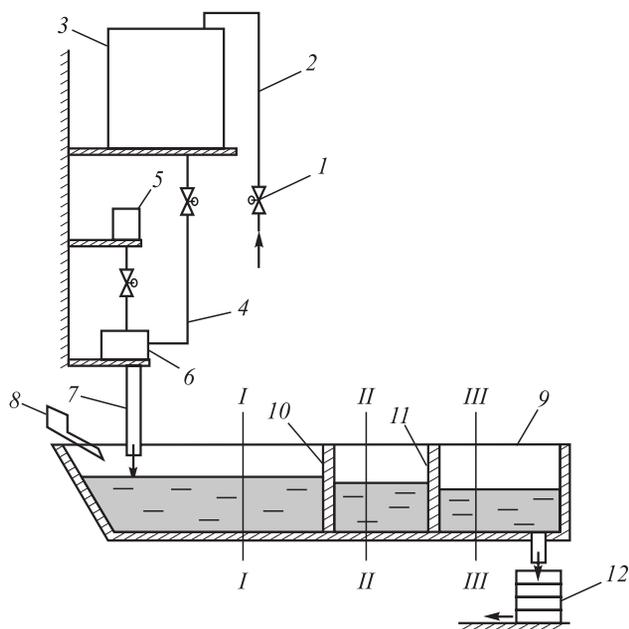


Рис. 1. Схема модельной установки:

1 – входной вентиль; 2 – линия подвода воды; 3 – модель промежуточной емкости (плавильная печь); 4 – трубопровод; 5 – резервуар с красителем; 6 – смеситель; 7 – разливочная труба; 8 – подача НВ; 9 – модель промежуточного ковша между вакуум-индукционной печью и изложницей; 10 – разделительная перегородка с отверстиями; 11 – пенокерамический фильтр; 12 – набор сит для просеивания НВ; I – I, II – II, III – III – сечения замера скоростей потоков расплава

Fig. 1. Scheme of the model installation:

1 – inlet valve; 2 – water supply line; 3 – model of intermediate tank (melting furnace); 4 – pipeline; 5 – tank with dye; 6 – mixer; 7 – casting tube; 8 – supply of non-metallic inclusions; 9 – model of tundish between vacuum induction furnace and mold; 10 – dividing partition with openings; 11 – ceramic foam filter; 12 – a set of sieves for screening the non-metallic inclusions; I – I, II – II, III – III – sections for measuring flow rates of the melt

Скорости гидротоков на модели определялись вводом красителя в подводимую струю воды и многократным фиксированием их фронтов с помощью видеосъемки на фоне координатной сетки и дальнейшей компьютерной обработки полученных результатов. Аналогично фиксировалось перемещение НВ до фильтрационной перегородки.

Эффективность фильтрации  $f$  определялась по массе частиц, уловленных на выходе из разливочной емкости и просеянных по фракциям

$$f = \frac{m_o - m_b}{m_o} 100 \%, \quad (11)$$

где  $m_o$  – исходная масса НВ;  $m_b$  – масса НВ, прошедших через фильтр.

В качестве НВ в модельной жидкости использовались измельченные и просеянные по фракциям частички пробки, соснового и дубового угля, сосновой и осиновой крошки, графита в диапазоне плотностей от 250 до 900 кг/м<sup>3</sup> и приведенных диаметров от 0,1 до 0,7 мм.

На рис. 2 и 3 приведены общий вид модели промежуточного ковша с вертикальным и горизонтальным фильтрами 20 ррi и разделительной перегородкой с пятью отверстиями.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 и 5 приведены результаты исследования эффективности фильтрации при использовании вертикального и горизонтального ПКФ от размеров НВ. Заштрихованное пространство – область фильтрации всех НВ от самых легких до тяжелых.

Легкие НВ плотностью от 2300 кг/м<sup>3</sup> имитировались на гидравлической модели осиновыми опилка-



Рис. 2. Общий вид модели промежуточного ковша с разделительной перегородкой с пятью отверстиями (1) и вертикальным пенокерамическим фильтром (2)

Fig. 2. General view of the model of tundish with dividing baffle with five holes (1) and vertical ceramic foam filter (2)

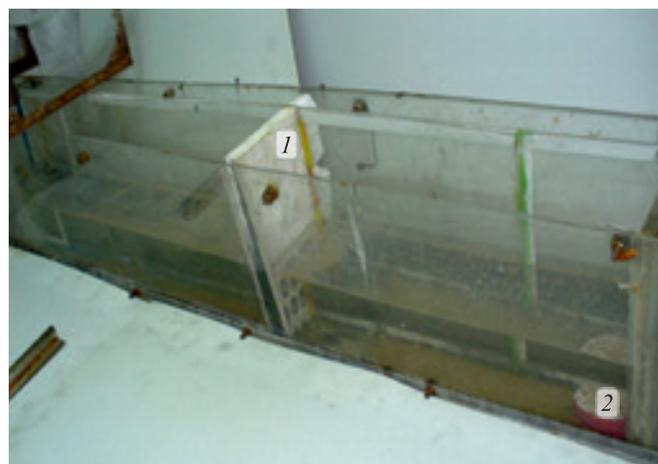


Рис. 3. Общий вид модели промежуточного ковша с разделительной перегородкой (1) и горизонтальным пенокерамическим фильтром (2)

Fig. 3. General view of the model of tundish with dividing baffle (1) and horizontal ceramic foam filter (2)

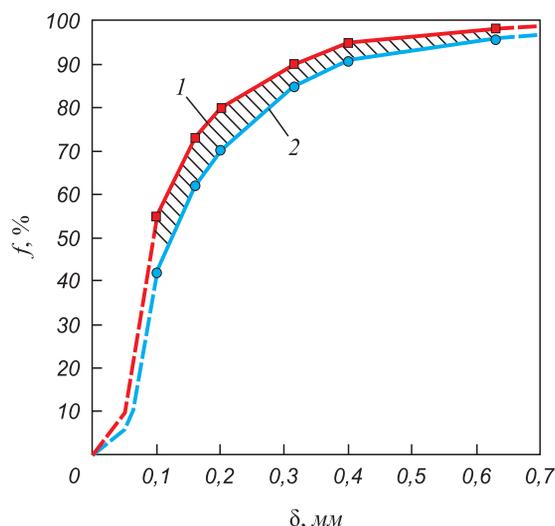


Рис. 4. Зависимость эффективности фильтрации при использовании вертикального пенокерамического фильтра (20 ppi толщиной 24 мм) от размеров неметаллических включений:

1 – модельные НВ – графит; 2 – модельные НВ – опилки

Fig. 4. Dependence of filtration efficiency when using a vertical ceramic foam filter (20 ppi with a thickness of 24 mm) on non-metallic inclusions sizes:

1 – model non-metallic inclusions – graphite; 2 – model non-metallic inclusions – sawdust

ми плотностью  $350 \text{ кг/м}^3$ , а тяжелые плотностью до  $5900 \text{ кг/м}^3$  – графитом плотностью  $900 \text{ кг/м}^3$ .

Как следует из рис. 4, эффективность фильтрации зависит как от размеров НВ, так и их плотности. Повысить эффективность фильтрации можно, увеличивая толщину фильтра или уменьшая размеры фильтрационных отверстий (увеличивая ppi). Однако эти параметры связаны с пропускной способностью фильтра, которая ограничена при установленном в технологическом процессе расходе металла. Как показали промышленные испытания [8], при расходе никелевого расплава порядка  $8 \text{ кг/с}$  оптимальная толщина фильтра (20 ppi) составляла 24 мм. При увеличении толщины повышалась разность уровней металла в сечениях II – II и III – III (см. рис. 1), что приводило к зарастанию каналов в области перепада высот и снижению продолжительности его работы и, соответственно уменьшению эффективности фильтрации.

Оценка эффективности фильтрации проводилась так же при другом варианте, более удобном с точки зрения установки, горизонтальном расположении фильтрующего элемента в области выпускного отверстия (см. рис. 3). Однако исследования показали, что при тех же параметрах (толщина 24 мм, 20 ppi) его использование снижает эффективность фильтрации на 16 – 18 % (рис. 5). Это связано с уменьшением эффективной поверхности фильтрации и уменьшением траектории движения НВ в фильтре за счет изменения направления гравитационной силы и силы Архимеда по отношению направления движения потока рас-

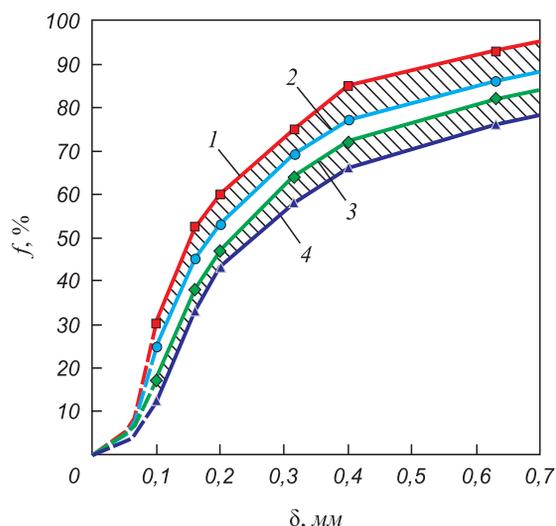


Рис. 5. Зависимость эффективности фильтрации при использовании горизонтального пенокерамического фильтра (20 ppi) от размеров неметаллических включений:

1, 2 – толщиной 24 мм; 3, 4 – толщиной 12 мм; 1, 3 – графит; 2, 4 – опилки

Fig. 5. Dependence of filtration efficiency when using a horizontal ceramic foam filter (20 ppi) from the sizes of non-metallic inclusions:

1, 2 – 24 mm thick; 3, 4 – 12 mm thick; 1, 3 – graphite; 2, 4 – sawdust

плава в плоскости фильтра. Кроме того, снижается пропускная способность фильтра. Для ее повышения уменьшалась толщина фильтра до 12 мм (см. рис. 5), что привело к дополнительному снижению эффективности фильтрации еще на 15 – 18 %.

На рис. 6 показаны эпюры скоростей в трех сечениях промежуточного ковша в зависимости от конструкции промежуточной перегородки. В качестве контрольного варианта, используемого в промышленных условиях, служит промежуточная перегородка с пятью отверстиями, расположенными на двух уровнях в нижней части. Получено, что при использовании этой перегородки (рис. 6, а) наблюдается неравномерное распределение скоростей по высоте промежуточного ковша. В сечении II – II (перед фильтром) перепад скоростей по высоте составляет от  $0,02$  до  $0,07 \text{ м/с}$ , а в верхней части возникает обратный поток со скоростью –  $0,01 \text{ м/с}$ .

В качестве альтернативного варианта была разработана перегородка с десятью отверстиями на четырех уровнях, равномерно расположенных по высоте. При ее использовании (рис. 6, б) повысилась равномерность распределения скоростей потока расплава с перепадом скоростей от  $0,03$  до  $0,055 \text{ м/с}$  при незначительном обратном потоке в верхней части. Более равномерный фронт скоростей потока перед вертикальным фильтром позволил получить более равномерные условия фильтрации по высоте, что привело к некоторому повышению эффективности его работы и увеличению на 10 – 15 % живучести (времени работы) фильтра.

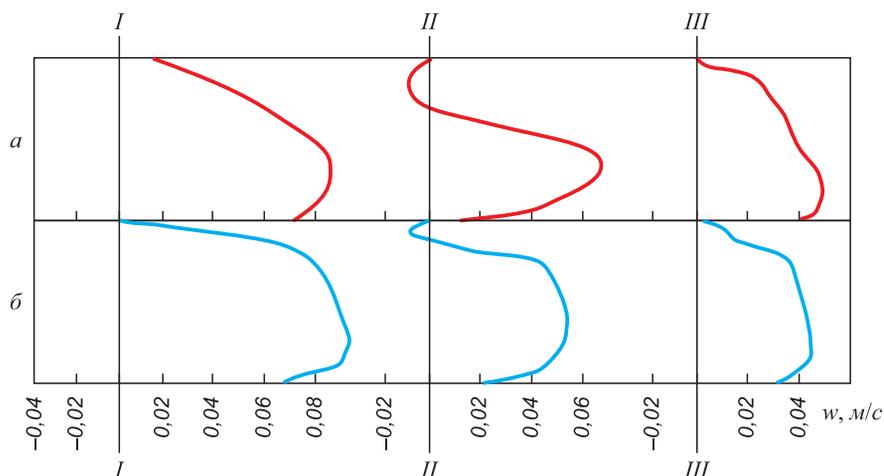


Рис. 6. Эпюры замера скоростей потоков расплава:

*a* – вариант перегородки с пятью отверстиями (2 уровня); *b* – вариант перегородки с десятью отверстиями (4 уровня); *I* – *I*, *II* – *II*, *III* – *III* – сечения замера скоростей потоков расплава (см. рис. 1)

Fig. 6. Plots of measuring the melt flow rates:

*a* – baffle with 5 holes (2 levels); *b* – baffle with 10 holes (4 levels); *I* – *I*, *II* – *II*, *III* – *III* - sections for measuring the melt flow rates (Fig. 1)

## ВЫВОДЫ

Разработанная методика физического моделирования процессов фильтрации металлических расплавов с учетом динамики потоков металла и НВ позволяет проводить исследования эффективности работы различных фильтрующих устройств с учетом их параметров (толщины, плотности расположения каналов, размеров) и параметров НВ с учетом геометрии разливающего устройства, схемы расположения фильтрационных перегородок и гидродинамики потоков металлических расплавов. Данная методика дает возможность конструировать разливные фильтрационные системы с учетом их технологических особенностей.

В результате проведенных исследований были установлены зависимости между эффективностью фильтрации, размерами и видом НВ при использовании вертикальных и горизонтальных пенoкерамических фильтров в процессе разлива никелевых расплавов в промежуточном ковше вакуумно-индукционной установки. Определено, что при вертикальном расположении фильтра эффективность его работы выше, чем при горизонтальном. Дополнительным средством повышения эффективности работы фильтрационной системы является использование разделительной перегородки с отверстиями, которая обеспечивает равномерное распределение потоков расплава по высоте перед фильтром.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 36 – 52.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // *Технология легких сплавов*. 2007. № 2. С. 6 – 16.
3. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
4. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е. *Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование*. – М.: ВИАМ, 2016. – 368 с.
5. Hawranek R., Lelito J., Suchy J.S., Zak P. The simulation of a liquid cast iron flow through the gating system with filter // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2009. Vol. 54. No. 2. P. 351 – 358.
6. Uemura K., Takahashi M., Koyama S., Nitta M. Filtration mechanism of non-metallic inclusions in steel by ceramic loop filter // *ISIJ International*. 1992. Vol. 32. No. 1. P. 150 – 156.
7. Inoue R., Ueda S., Ariyama T., Suito H. Extraction of nonmetallic inclusion particles containing MgO from steel // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. No. 12. P. 2050 – 2055.
8. Демченко А.И., Шевяков В.Ф., Коровин В.А. и др. Повышение качества никелевого сплава фильтрацией через пенoкерамический фильтр // *Литейщик России*. 2019. № 6. С. 29 – 34.
9. Воеводина М.А. Оценка эффективности фильтрационного рафинирования металлических расплавов // *Вестник КрасГАУ*. 2011. № 11. С. 163 – 166.
10. Щукина И.Н., Воеводина М.А., Крушенко Г.Г. Очистка металлических расплавов фильтрованием в литейной форме // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Серия: Моделирование физико-механических и тепловых процессов*. 2011. № 3. С. 86 – 87.
11. Тэн Э.Б. Фильтрационное рафинирование жидких металлов // *Цветные металлы*. 2003. № 3. С. 64 – 69.
12. Rogler J., Heaslip L., Mehrvar M. Physical modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2005. Vol. 44. No. 3. P. 357 – 369.
13. Adaba O., O'Malley R., Xu M. etc. Three-dimensional study of inclusion morphology and size distribution in Mn-Si killed steel // *AISTech*, Philadelphia, USA, 2018.
14. Janiszewski K. Influence of slenderness ratios of a multi-hole ceramic filters at the effectiveness of process of filtration of non-metallic inclusions from liquid steel // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2012. Vol. 57. No. 1. P. 135 – 143.
15. Chakraborty S., O'Malley R., Bartlett L., Huddleston L. Effect of physical state of non-metallic inclusions on the accumulation within-magnesia-stabilized zirconia foam filters // *AISTech 2019 – Proc. of the Iron & Steel Technology Conf.*, 6 – 9 May 2019, Pittsburgh, Pa., USA. P. 1030 – 1040.

16. Raiber K., Hammerschmid P., Janke D. Experimental studies on AIO inclusions removal from steel melts using ceramic filters // *ISIJ International*. 1995. Vol. 35. No. 4. P. 380 – 388.
17. Janiszewski K., Kudlinski Z. The influence of non-metallic inclusions physical state on effectiveness of the steel filtration process // *Steel Research International*. 2006. Vol. 77. No. 3. P. 169 – 176.
18. Chakraborty S., O'Malley R., Bartlett L., Xu M. Efficiency of solid inclusion removal from the steel melt by ceramic foam filter: Design and experimental validation // *AFS Metalcasting Congress*, Fort Worth, USA, 2018.
19. Гушин В.Н., Ульянов В.А. Особенности физического и математического моделирования многофазных потоков // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2007. № 7. С. 45 – 47.
20. Гушин В.Н., Ульянов В.А., Васильев В.А. Математическое и физическое моделирование теплофизических процессов в металлургии. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. – 157 с.

Поступила в редакцию 12 июля 2019 г.

После доработки 22 марта 2020 г.

Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 6, pp. 428–435.

## PHYSICAL MODELING OF FILTRATION PROCESSES OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS DURING CASTING IN A VACUUM INDUCTION INSTALLATION

*V.N. Gushchin, V.A. Korovin, S.V. Belyaev, A.I. Demchenko*

**Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia**

**Abstract.** The article considers issues related to the efficiency of metal melts' filtration depending on the size of non-metallic inclusions, parameters of ceramic foam filters and their location options. Studies of influence of the main structural elements on the filtration processes of nickel melts during casting in a vacuum induction installation were carried out on low-temperature physical models. Modeling of melt filtration processes is based on the hydrodynamic similarity of the processes of motion of melt flows and nonmetallic inclusions in casting tanks. A modeling technique has been developed, the scale has been determined and a model installation has been made. Influence of the arrangement of filtration and dividing walls on the dynamics of metal flows, non-metallic inclusions and filtration efficiency is considered. The efficiency of nickel melts filtration is described depending on the technical parameters both on the filter itself (effective filtration surface, filter thickness, channel dimensions, number of channels per unit area), as well as on the type and size of non-metallic inclusions, design features of the casting device and filter layouts. It was found that the overall filtration efficiency is influenced by the rate and uniformity of the melt flows' distribution in front of the filter. To ensure uniform distribution of the melt flow rates, a dividing wall with bypass holes is installed in front of the filter, the location of which and their number was also the subject of research. As a result of the studies, the relationships were established between the filtration efficiency, the size and type of non-metallic inclusions when using vertical and horizontal foam ceramic filters during the casting of nickel melts in an intermediate casting tank of a vacuum induction installation. It was found that with a vertical arrangement of the filter, its efficiency is higher than with a horizontal one. An additional means of increasing efficiency of the filtration system is the use of a dividing wall. The optimal number of holes and the location of the baffle in the casting tank were determined, ensuring a uniform distribution of melt flows along the height in front of the filter and an increase in its operation time.

**Keywords:** filters, physical modeling, fluid flow dynamics of a melt, non-metallic inclusions, filtration efficiency.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-6-428-435

### REFERENCES

1. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Casting heat-resistant nickel alloys of new generation. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2012, no. 5, pp. 36–52. (In Russ.).
2. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Casting heat-resistant nickel alloys for promising aircraft GTE. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2007, no. 2, pp. 6–16. (In Russ.).
3. Shalin R.E., Svetlov, I.L., Kachanov, E.B. *Monokristally nikelevykh zharoprochnykh splavov* [Monocrystals of heat-resistant nickel alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1997, 336 p. (In Russ.).
4. Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E. *Metallurgiya liteinykh zharoprochnykh splavov: tekhnologiya i oborudovanie* [Metallurgy of casting heat-resistant alloys: Technology and equipment]. Moscow: VIAM, 2016, 368 p. (In Russ.).
5. Hawranek R., Lelito J., Suchy J.S., Zak P. The simulation of a liquid cast iron flow through the gating system with filter. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2009, vol. 54, no. 2, pp. 351–358.
6. Uemura K, Takahashi M., Koyama S., Nitta M. Filtration mechanism of non-metallic inclusions in steel by ceramic loop filter. *ISIJ International*. 1992, vol. 32, no. 1, pp. 150–156.
7. Inoue R., Ueda S., Ariyama T., Suito H. Extraction of nonmetallic inclusion particles containing MgO from steel. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 12, pp. 2050–2055.
8. Demchenko A.I., Shevyakov V.F., Korovin V.A., Belyaev S.V., Gushchin V.N. Improving the quality of nickel alloy by filtration through a ceramic foam filter. *Liteishchik Rossii*. 2019, no. 6, pp. 29–34. (In Russ.).
9. Voevodina M.A. Evaluation of the efficiency of filtration refining of metal melts. *Vestnik KrasGAU*. 2011, no. 11, pp. 163–166. (In Russ.).
10. Shchukina I.N., Voevodina M.A., Krushenko G.G. Purification of metal melts by filtration in a mold. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики. Seriya: Modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh i teplovykh protsessov*. 2011, no. 3, pp. 86–87. (In Russ.).
11. Ten E.B. Filtration refining of liquid metals. *Tsvetnye metally*. 2003, no. 3, pp. 64–69. (In Russ.).
12. Rogler J. Heaslip L., Mehrvar M. Physical modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2005, vol. 44, no. 3, pp. 357–369.
13. Adaba O., O'Malley R., Xu M., Bartlett L., Lekakh S. *Three-dimensional study of inclusion morphology and size distribution in Mn-Si killed steel*. AISTech, Philadelphia, USA, 2018.
14. Janiszewski K. Influence of slenderness ratios of a multi-hole ceramic filters at the effectiveness of process of filtration of non-metallic inclusions from liquid steel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2012, vol. 57, no. 1, p. 135–143.
15. Chakraborty S., O'Malley R., Bartlett L., Huddleston L. Effect of physical state of non-metallic inclusions on the accumulation within magnesia-stabilized zirconia foam filters. *AISTech 2019 – Proc. of the Iron & Steel Technology Conference, 6 – 9 May 2019, Pittsburgh, Pa., USA*, pp. 1030–1040.
16. Raiber K., Hammerschmid P., Janke D. Experimental studies on AIO inclusions removal from steel melts using ceramic filters. *ISIJ International*. 1995, vol. 35, no. 4, pp. 380–388.

17. Janiszewski K., Kudlinski Z. The Influence of non-metallic inclusions physical state on effectiveness of the steel filtration process. *Steel Research International*. 2006, vol. 77, no. 3, pp. 169–176.
18. Chakraborty S., O'Malley R., Bartlett L., Xu M. Efficiency of solid inclusion removal from the steel melt by ceramic foam filter: Design and experimental validation. *AFS Metalcasting Congress, Fort Worth, USA, 2018*.
19. Gushchin V.N., Ul'anov V.A. Features of physical and mathematical modeling of multiphase flows. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 7, pp. 45–47. (In Russ.).
20. Gushchin V.N., Ul'anov V.A., Vasil'ev V.A. *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov v metallurgii* [Mathematical and physical modeling of thermophysical processes in metallurgy]. N.Novgorod: NSTU, 2014, 157 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**V.N. Gushchin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment" (gushinvn@rambler.ru)

**V.A. Korovin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment"

**S.V. Belyaev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment"

**A.I. Demchenko**, Postgraduate of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment"

Received July 12, 2019

Revised March 22, 2020

Accepted June 2, 2020