

УДК: 669.715:62-229.31

**А. В. Яценко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА В МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

*Рассмотрен процесс циркуляционного фильтрования алюминиевого расплава в магнитодинамической установке и механизмы удержания неметаллических включений пеночерamicким фильтром. Разработана и опробована компьютерная модель данного процесса, с помощью которой произведена оценка эффективности циркуляционного фильтрования. Расчёт показал, что процесс циркуляционного фильтрования алюминиевого расплава в магнитодинамической установке позволит удалить 99 % неметаллических включений независимо от их начального содержания в расплаве. Расчётное время обработки не превышает реальную продолжительность комплексного процесса рафинирования, включающего продувку аргоном и фильтрование, во время которого осуществляется исследуемый процесс.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, фильтрование, рафинирование, циркуляция, магнитодинамическая установка, алюминиевый расплав, пеночерamicкий фильтр.

*Розглянуто процес циркуляційного фільтрування алюмінієвого розплаву в магнітодинамічній установці та механізми утримання неметалевих включень піночерamicним фільтром. Розроблено та використано комп'ютерну модель цього процесу, за допомогою якої проведено оцінку ефективності циркуляційного фільтрування. Розрахунок показав, що процес циркуляційного фільтрування алюмінієвого розплаву в магнітодинамічній установці дозволить видалити 99 % неметалевих включень незалежно від їх початкового вмісту в розплаві. Розрахунковий час обробки не перевищує реальної тривалості комплексного процесу рафінування, який включає продувку аргоном та фільтрування, під час якого проводять досліджуваний процес.*

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, фільтрування, рафінування, циркуляція, магнітодинамічна установка, алюмінієвий розплав, піночерamicний фільтр.

*The process of molten aluminum circulation filtration in a magnetodynamic unit and the mechanisms of non-metallic inclusions retaining by ceramic foam filters are considered. The computer model of this process is developed and the estimation of circulation filtration efficiency is made by its use. The calculation showed that molten aluminum circulation filtration in magnetodynamic unit allows removing 99% of non-metallic inclusion regardless of their initial content in the melt. The estimated time of processing doesn't exceed the real duration of complex refining, including argon blow and filtration.*

**Keywords:** computer modeling, filtration, refining, circulation, magnetodynamic installation, aluminum melt, ceramic foam filter.

**В** отделе МГД ФТИМС НАН Украины разработан новый эффективный метод рафинирования алюминиевого расплава путём организации циркуляции расплава через пенокерамический фильтр в магнитодинамической установке [1]. Схема процесса показана на рис. 1.

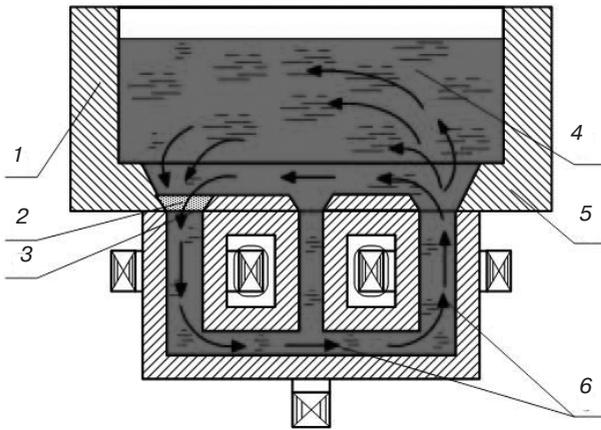


Рис. 1. Схема процесса циркуляционного фильтрования в магнитодинамической установке типа МДН-6А: 1 – миксер-дозатор МДН-6А; 2 – пенокерамический фильтр; 3 – устье бокового канала; 4 – алюминиевый расплав; 5 – тигель с жидким металлом; 6 – направление потока расплава

Процесс фильтрования осуществляют следующим образом. На боковом устье канала 3 устанавливают пенокерамический фильтр в специально подготовленное углубление в футеровке тигля. Установку включают в режим, при котором поток расплава 4 движется по контуру, обозначенному стрелками 6. Благодаря динамическому напору потока, фильтр 2 прижимается к устью бокового канала 3, поэтому не требуется дополнительного устройства для его удержания в рабочем положении. В процессе рафинирования алюминиевый расплав проходит через пенокерамический фильтр 2 и возвращается в тигель 5 установки 1, где содержится основная масса расплава.

В отличие от других технологий фильтрования, где расплав проходит через фильтр однократно, **особенность нового процесса рафинирования состоит в том, что профильтрованный расплав смешивается с жидким металлом, содержащемся в тигле, и снова проходит через фильтр.** Для теоретического обоснования эффективности данного метода, которая определяется не только качеством, но и продолжительностью рафинирования, была построена компьютерная модель, основанная на особенностях технологического процесса и механизме работы пенокерамического фильтра.

Известно, что пенокерамический фильтр имеет сеточный и адгезионный механизмы удержания неметаллических включений. При этом второй механизм зависит от ряда факторов, таких как: размер и состав включения, температура расплава, скорость потока расплава и траектория движения включения. Из-за этого в процессе фильтрования невозможно гарантировать удержание фильтром всех неметаллических включений, размер которых меньше среднего диаметра пор [2]. Схема работы фильтра в адгезионном режиме приведена на рис. 2.

В работе представлена компьютерная модель данного процесса. В основе модели программа, написанная на языке объективно-ориентированного программирования

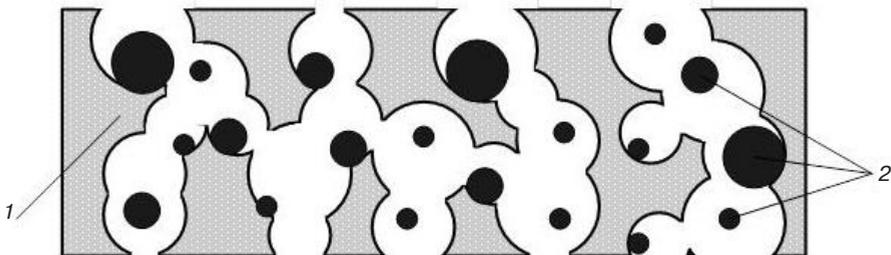


Рис. 2. Схема работы пенокерамического фильтра в адгезионном режиме: 1 – материал фильтра; 2 – неметаллические включения

javascript, основанная на принципе циклического вычисления с заданным условием прекращения работы. Моделируемый процесс был разделён на множество циклов. За один цикл принимается время, за которое расплав полностью заполняет фильтр, то есть происходит обработка одной порции расплава. По завершении каждого цикла производится расчёт текущей концентрации неметаллических включений в расплаве и массы жидкого металла, прокаченного через фильтр. Программа сверяет расчётные данные с заданным заранее условием прекращения вычислений, если оно ложно – расчёт повторяется, если условие истинно – работа программы завершена. В модели принято допущение, что скорость течения расплава через фильтр и эффективность его работы остаются неизменными на протяжении всего процесса рафинирования.

Было проведено моделирование трёх процессов:

- Однократное фильтрование без перемешивания рафинированного металла с ещё необработанным. Условие завершения расчёта – пропускание всей массы расплава через фильтр.

- Циркуляционное фильтрование с условием «мгновенного» перемешивания рафинированного металла со всем объёмом расплава. Условие завершения расчёта – снижение концентрации неметаллических включений до 1 % от начальной величины.

- Циркуляционное фильтрование с условием «отсроченного» перемешивания рафинированного металла со всем объёмом расплава. Под «отсроченным» перемешиванием подразумевается, что расплав, поступающий в зону рафинирования, имеет более высокую концентрацию неметаллических включений, чем усреднённая концентрация неметаллических включений для всего объёма металла в текущий момент времени. Условие завершения расчёта – снижение концентрации неметаллических включений до 1 % от начальной величины.

Третий тип модели наиболее соответствует реальному технологическому процессу, блок-схема данной программы приведена на рис. 3. Для учёта особенности технологического процесса, а именно адгезионного механизма фильтрования в пенокерамическом фильтре, в модель был введён коэффициент вероятности удержания неметаллических включений  $k$  при их прохождении через фильтр, то есть какой процент неметаллических включений с размером меньше среднего диаметра пор будет гарантированно удержан фильтром. На схеме приняты следующие обозначения:  $h$  – высота фильтра, мм;  $S$  – рабочее сечение фильтра, мм<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент вероятности удержания включений, размер которых меньше среднего диаметра пор фильтра;  $R$  – рабочий ресурс фильтра, кг;  $w$  – пропускная способность фильтра, кг/с;  $M$  – масса расплава, кг;  $\rho$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $C_0$  – начальная концентрация неметаллических включений, %;  $Q$  – массовый расход расплава, кг/с;  $z$  – условие «отсроченного» перемешивания расплава;  $v$  – скорость движения металла через фильтр, м/с;  $t$  – время одного цикла, с;  $m_0$  – масса расплава, обработанная за один цикл, кг;  $i$  – номер текущего цикла;  $\Delta C$  – снижение концентрации неметаллических включений за текущий цикл;  $C_i$  – текущая концентрация неметаллических включений;  $M_f$  – масса расплава, прошедшего через фильтр, кг;  $I$  – количество циклов;  $T$  – общее время обработки, с;  $C_k$  – концентрация неметаллических включений после завершения рафинирования;  $N$  – кратность пропуска расплава через фильтр. Компьютерная модель построена таким образом, что для её работы нет необходимости задавать реальное значение содержания неметаллических включений в расплаве. Суммарное количество всех неметаллических включений, находящихся в расплаве, принимается за единицу, и работа программы будет завершена после того, как их концентрация в металле снизится на 99 %.

Расчёты проводились для четырёх значений коэффициента  $k = 100; 90; 70$  и 50 %, масса расплава  $M = 250$  кг, массовый расход жидкого металла через канал установки был принят за  $Q = 1$  кг/с.

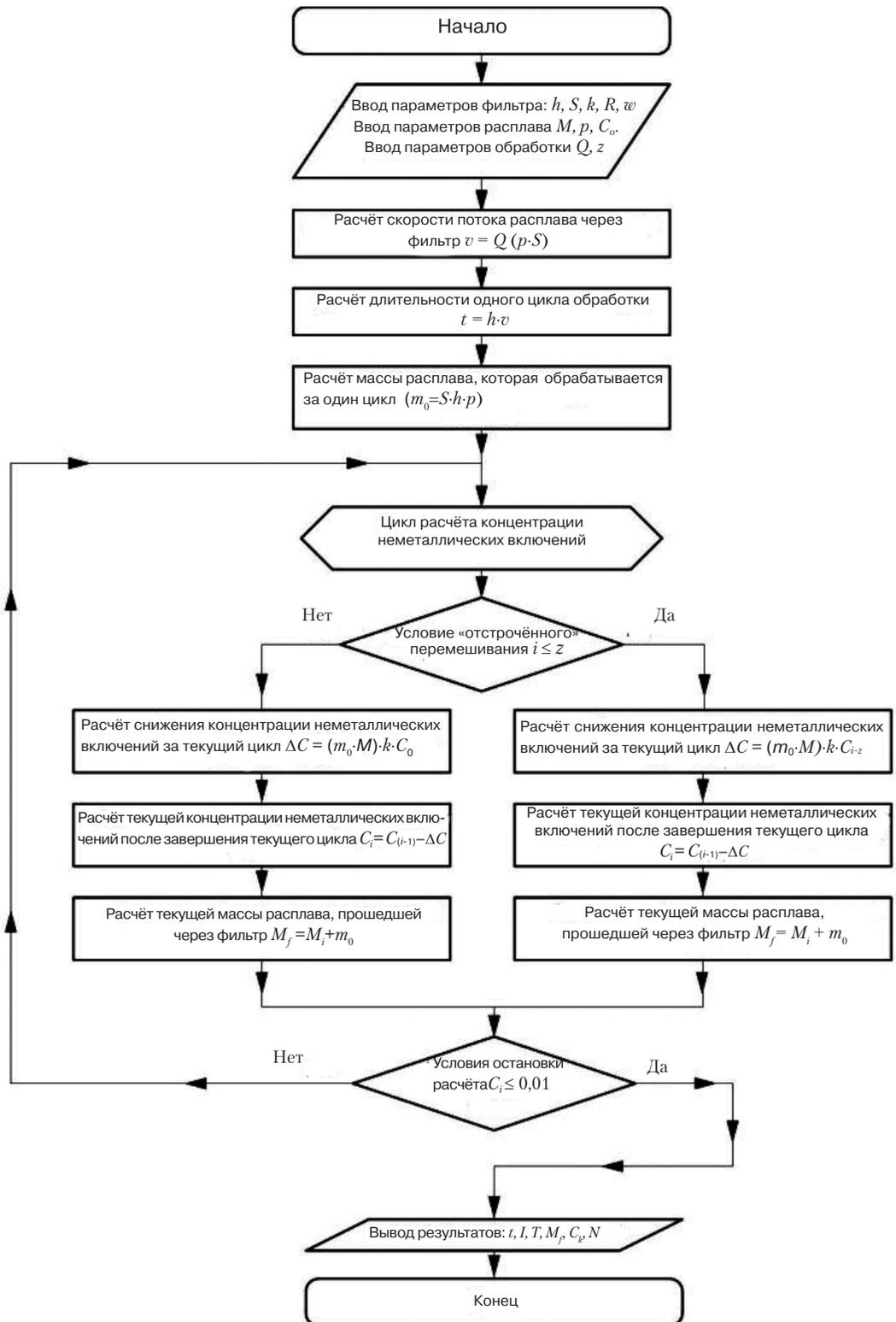


Рис. 3. Блок-схема программы компьютерной модели процесса циркуляционного фильтрования для условия «отсроченного» перемешивания

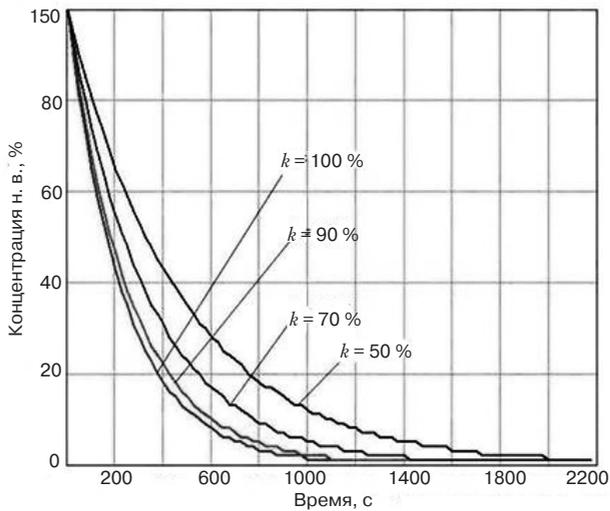
Расчёт показал, что при моделировании процесса однократного фильтрования без перемешивания общее время обработки  $T = 4$  мин, масса профильтрованного расплава  $M_f = 250$  кг. Для различных значений коэффициента  $k = 100; 90; 70$  и  $50\%$  конечная концентрация неметаллических включений в расплаве составила  $C_k = 0; 10; 30$  и  $50\%$ , кратность прокачки расплава через фильтр  $N = 1$  для всех четырёх случаев.

При моделировании процесса циркуляционного фильтрования с условием «мгновенного» перемешивания для различных значений коэффициента  $k = 100; 90; 70$  и  $50\%$  конечная концентрация неметаллических включений в расплаве составила  $C_k = 1\%$  для всех четырёх случаев. Общее время обработки  $T = 18; 20; 26$  и  $36$  мин, масса профильтрованного расплава  $M_f = 1146; 1275; 1640$  и  $2297$  кг, кратность прокачивания расплава через фильтр  $N = 4,58; 5,1; 6,56$  и  $9,2$  соответственно.

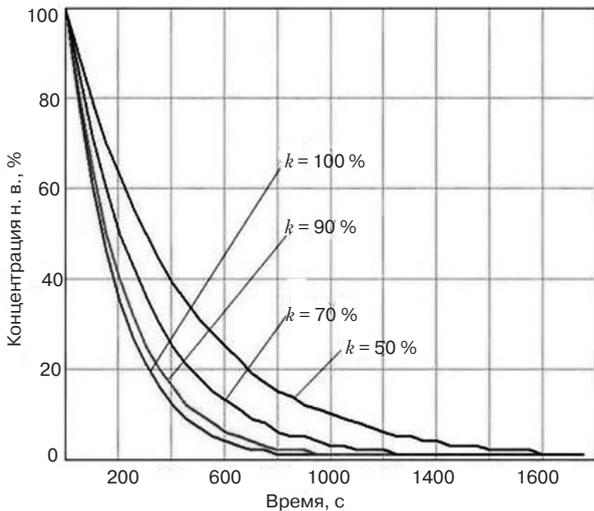
При моделировании процесса циркуляционного фильтрования с условием «отсроченного» перемешивания для различных значений коэффициента  $k = 100; 90; 70$  и  $50\%$  конечная концентрация неметаллических включений в расплаве составила  $C_k = 1\%$  для всех четырёх случаев. Общее время обработки  $T = 14; 17; 22$  и  $33$  мин, масса профильтрованного расплава  $M_f = 919; 1051; 1426$  и  $2101$  кг, кратность прокачивания расплава через фильтр  $N = 3,7; 4,2; 5,7$  и  $8,4$  соответственно. Результаты проведённых расчётов для второго и третьего этапа отображены графически на рис. 4.

Анализ результатов показал, что при однократном пропускании всего объёма расплава через фильтр без перемешивания рафинированного металла с необработанным невозможно удалить из расплава около  $90\%$  всех неметаллических включений, если заданный коэффициент вероятности удержания включений фильтром  $k$  будет меньше  $90\%$ . Единственным преимуществом данного режима рафинирования является минимальное время обработки. Подобные процессы можно реализовывать при установке фильтра на пути расплава в форму или кристаллизатор, а также в проточных системах фильтрования. Но технологические особенности магнитодинамического миксер-дозатора МДН-6А не позволяют осуществлять процесс однократного фильтрования расплава без перемешивания рафинированного жидкого металла с остальной массой расплава, ещё не прошедшей обработку.

В свою очередь, циркуляционное фильтрование в магнитодинамической установке позволяет осуществить удаление  $99\%$  всех неметаллических включений путём применения метода циркуляционного фильтрования алюминиевого расплава в магнитодинамической установке через пенокерамический фильтр независимо от их начального содержания в жидком металле. В сравнении с однократным фильтрованием величина заданного коэффициента вероятности удержания включений фильтром  $k$  влияет только на время рафинирования и массу профильтрованного расплава, а не на качество очистки жидкого металла от неметаллических включений. Увеличение общего времени обработки  $T$  можно компенсировать путём подбора более рациональных режимов течения расплава через канал установки в зависимости от пропускной способности  $w$  используемого пенокерамического фильтра. В реальных условиях метод циркуляционного фильтрования алюминиевого расплава в магнитодинамической установке типа МДН-6А является составляющей частью комплексного процесса рафинирования, включающего продувку аргоном и фильтрование через пенокерамический фильтр. Продувка аргоном проводится в течение  $10-15$  мин, после чего расплав отстаивается  $20-30$  мин. Все это время жидкий металл циркулирует через пенокерамический фильтр. Таким образом, для проведения циркуляционного фильтрования не нужно увеличивать время технологического процесса приготовления алюминиевого расплава в магнитодинамическом миксере-дозаторе. Расчётное время фильтрования, установленное в результате моделирования, и реальная про-



а



б

Рис. 4. Графическое решение компьютерного моделирования: а – циркуляционное фильтрование с условием «мгновенного» перемешивания; б – циркуляционное фильтрование с условием «отсроченного» перемешивания

должительность фильтрования полностью сопоставимы.

Разработанная компьютерная модель позволяет рассчитывать следующие параметры: текущую концентрацию неметаллических включений в заданный момент времени, выраженную в процентах от начальной величины  $C_0 - C_t$ , массу профильтрованного металла –  $M_f$ , время обработки –  $T$ , скорость потока расплава –  $v$  и кратность фильтрования –  $N$ . А также проводит сравнение заданных для расчёта данных с пропускной способностью  $w$  и рабочим ресурсом фильтра  $R$ , то есть проверяет заданные для расчёта данные на соответствие реальным технологическим параметрам процесса циркуляционного фильтрования в магнитодинамической установке.

В результате компьютерного моделирования процесса циркуляционного фильтрования алюминиевого расплава в магнитодинамической установке показана возможность снижения концентрации неметаллических включений до 1% от их начального содержания в расплаве.



### Список литературы

1. Патент UA 90327, Україна, МПК C22B9/02C22B9/00. Спосіб рафінування розплавів фільтруванням // В. І. Дубоделов, В. М. Фікссен, М. А. Слажнев, А. О. Горшков (ФТІМС НАН України). – Заявл. 11.29.2008; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.
2. Теоретические и прикладные аспекты процесса фильтрационного рафинирования жидких металлов: доклад на 65-м Международном конгрессе литейщиков. – Э. Б. Тен, МИСиС, И. А. Дибров. – Корея, 2002.

Поступила 30.03.2015