

## МЕХАНИЗМ УДАЛЕНИЯ СЕРЫ И ФОСФОРА ИЗ СТАЛИ У8 ФИЛЬТРАЦИЕЙ РАСПЛАВА ЧЕРЕЗ ПЕНОКЕРАМИКУ

Е.А. Стоякина  
А.Г. Дегтярева

safronova.e@me.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*Рассмотрен механизм физико-химических процессов фильтрации твердых соединений серы и фосфора в расплаве стали У8, протекающих через пористую керамику. Изучено строение пористых каналов фильтра. Построена 3D-модель гидроканалов фильтра, в которых перемещается расплав. Проведено моделирование движений соединений примесей в гидроканалах. Определены поверхности гидравлических каналов, где ожидается осаждение твердых частиц. Найдены силы, действующие на частицы разных размеров и форм от потока расплава. Получен критерий фильтрации частиц.*

### Ключевые слова

*Фильтрация, пенокерамика, макроструктура, моделирование, гидроканалы, адгезия*

Поступила в редакцию 11.10.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

**Введение.** Металлы — наиболее распространенные и широко используемые материалы как в промышленном производстве, так и в бытовом использовании человека. Особенное значение приобретают металлы в настоящее время, когда они находят широкое применение в машиностроении, транспортной отрасли, в промышленном, жилищном и дорожном строительстве и в других сферах экономики. Важное значение среди разнообразных сплавов металлов имеют стали.

Сталь представляет собой сплав железа с углеродом. Как и в чугунах, наряду с углеродом в стали всегда присутствуют в виде примесей сера и фосфор. Сера оказывает негативное влияние на пластичность, ударную вязкость, свариваемость и качество поверхности металлического сплава, особенно этого касается сталей с низким содержанием углерода и марганца. Сера характеризуется очень сильной склонностью к сегрегации по границам зерен, что приводит к снижению пластичности сталей в горячем состоянии. Это явление называется красноломкостью. Фосфор сегрегирует при затвердевании стали, но в меньшей степени, чем углерод и сера. Фосфор растворяется в феррите, за счет чего повышается прочность сталей. С увеличением содержания фосфора в сталях их пластичность и ударная вязкость снижаются и повышается склонность к хладноломкости [3].

Для того чтобы уменьшить количество серы и фосфора, расплав стали необходимо пропустить через пенокерамический фильтр, предварительно добавив в него специальный компонент, который образует соединения с серой и фосфором. Температура плавления компонента должна быть выше температуры расплава [6].

В настоящей работе рассматривается фильтрация кристаллических частиц вредной примеси серы из расплава инструментальной углеродистой стали марки У8. Содержание углерода в такой стали составляет до 0,028 %, фосфора — 0,025 %.

**Получение пенокерамического фильтра и его макроструктура.** Основной принцип получения пенокерамических фильтров состоит в следующем. Модель из пенополиуретана открытопористого пропитывается керамической суспензией, избыток суспензии удаляется, проводится сушка покрытия и высокотемпературный обжиг, в ходе которых разлагается и возгоняется пенополиуретан, происходит спекание керамики [4], [9].

Взвешивание на аналитических весах образца фильтра после спекания порошка оксида алюминия показало, что фильтр диаметром 60 мм и высотой 25 мм весит 35 г.

Исследование макроструктуры фильтра после спекания оксида алюминия показало, что он имеет ретикулярную (периодическую структуру) в трехмерном пространстве. Фильтр представляет собой чередование сферических пор диаметром 5–6 мм, соединенных между собой выпуклыми отверстиями диаметром порядка 2 мм, иногда с перемычкой в отверстии (рис. 1). Фильтр имеет форму шайбы высотой  $h = 25$  мм и диаметром  $d = 60$  мм.

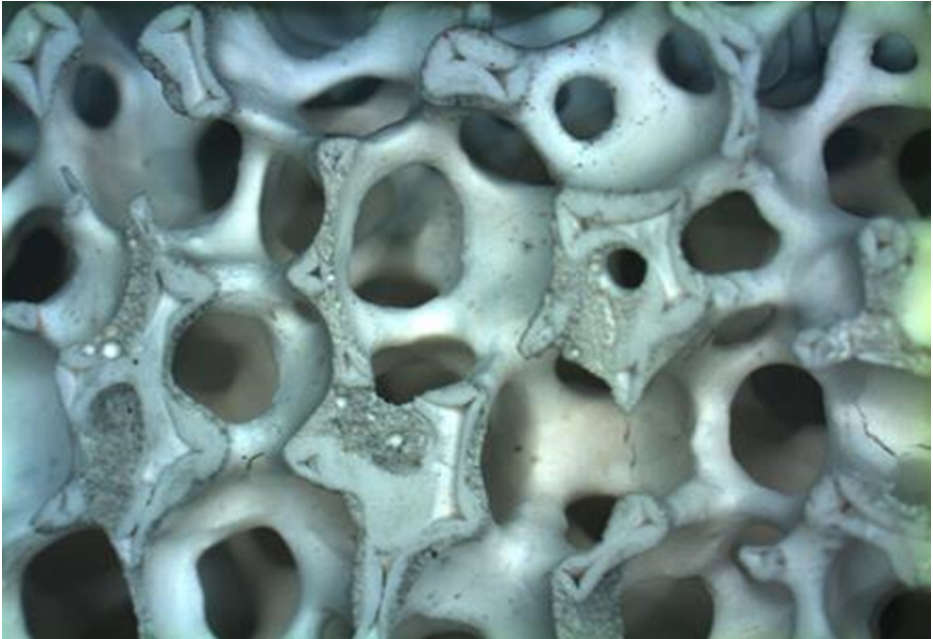


Рис. 1. Макроструктура пенокерамического фильтра

**Оптимальная скорость движения расплава.** Эффективность фильтрации расплавов во многом зависит от режима течения потока расплава: ламинарного или турбулентного. Для каждого вида течения существует критическое число Рейнольдса,  $Re_{кр}$ , которое, как принято считать, определяет переход от лами-

нарного течения к турбулентному. При  $Re < Re_{кр}$  происходит движение потока в ламинарном режиме, при  $Re > Re_{кр}$  возможно возникновение турбулентности. Границей перехода от турбулентного к критическому режиму течения является  $Re_{кр} = 2300$  [1]. Следует отметить, что турбулентное движение расплава в порах фильтра характеризуется значительными потерями давления, вызванным возникновением в нем инерционных сил [5]. Поэтому фильтрацию сплава следует осуществлять с небольшими скоростями и при ламинарном режиме его движения в порах фильтра. Такой режим в наибольшей мере будет предотвращать смывание потоком металла осевших на поверхности фильтра неметаллических включений [10]. Число  $Re$  рассчитывается по формуле из работы [2]

$$Re = \frac{vd}{\vartheta},$$

где  $v$  — скорость движения расплава, м/с;  $d$  — гидравлический диаметр, м;  $\vartheta$  — кинематическая вязкость,  $m^2/c$ .

Рассмотрим режим течения расплава при интервале скоростей  $v = 0,001...17$  м/с; при этом гидравлический диаметр  $d = 0,005$  м, кинематическая вязкость  $\vartheta = 0,64 \cdot 10^{-6}$   $m^2/c$ .

Данные расчета приведены в таблице. Из расчетов видно, что ламинарный режим движения потока расплава по гидроканалам фильтра происходит в интервале скоростей  $v = 0,001...0,29$  м/с, при этом данным скоростям соответствуют значения  $Re = 7,81...2280$ . С увеличением скорости до 0,43 м/с происходит переход в турбулентный режим, который является нежелательным. Для дальнейших расчетов примем среднюю скорость по ламинарному режиму, т. е.  $v = 0,01$  м/с.

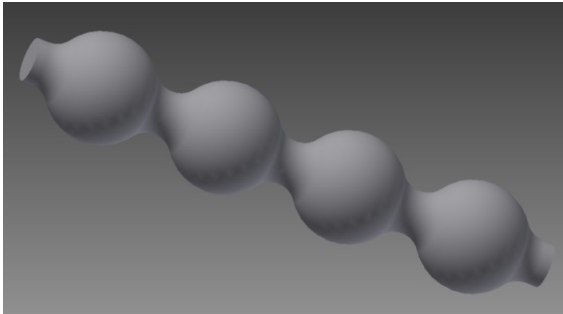
#### Установление режима движения потока расплава в зависимости от скорости

Скорость потока расплава, м/с	Вязкость кинематическая, $m^2/c$	Гидравлический диаметр, м	Число Рейнольдса, $Re$	Режимы
0,001	6,40E-07	5,00E-03	7,81E+00	Ламинарный
0,0015	6,40E-07	5,00E-03	1,17E+01	Ламинарный
0,00225	6,40E-07	5,00E-03	1,76E+01	Ламинарный
0,003375	6,40E-07	5,00E-03	2,64E+01	Ламинарный
0,0050625	6,40E-07	5,00E-03	3,96E+01	Ламинарный
0,00759375	6,40E-07	5,00E-03	5,93E+01	Ламинарный
0,011390625	6,40E-07	5,00E-03	8,90E+01	Ламинарный
0,017085938	6,40E-07	5,00E-03	1,33E+02	Ламинарный
0,025628906	6,40E-07	5,00E-03	2,00E+02	Ламинарный
0,038443359	6,40E-07	5,00E-03	3,00E+02	Ламинарный
0,057665039	6,40E-07	5,00E-03	4,51E+02	Ламинарный
0,086497559	6,40E-07	5,00E-03	6,76E+02	Ламинарный
0,129746338	6,40E-07	5,00E-03	1,01E+03	Ламинарный
0,194619507	6,40E-07	5,00E-03	1,52E+03	Ламинарный

Скорость потока расплава, м/с	Вязкость кинематическая, м <sup>2</sup> /с	Гидравлический диаметр, м	Число Рейнольдса, Re	Режимы
0,29192926	6,40E-07	5,00E-03	2,28E+03	Ламинарный
0,43789389	6,40E-07	5,00E-03	3,42E+03	Турбулентный
0,656840836	6,40E-07	5,00E-03	5,13E+03	Турбулентный
0,985261253	6,40E-07	5,00E-03	7,70E+03	Турбулентный
1,47789188	6,40E-07	5,00E-03	1,15E+04	Турбулентный
2,21683782	6,40E-07	5,00E-03	1,73E+04	Турбулентный
3,32525673	6,40E-07	5,00E-03	2,60E+04	Турбулентный
4,987885095	6,40E-07	5,00E-03	3,90E+04	Турбулентный
7,481827643	6,40E-07	5,00E-03	5,85E+04	Турбулентный
11,22274146	6,40E-07	5,00E-03	8,77E+04	Турбулентный
16,8341122	6,40E-07	5,00E-03	1,32E+05	Турбулентный

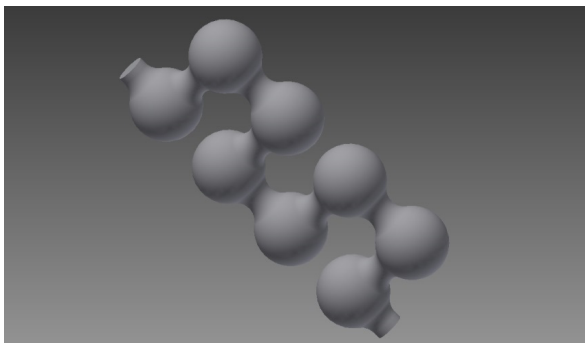
**Примечание.** Красным цветом выделена область турбулентного режима движения расплава.

**3D-модель гидроканалов фильтра.** В ходе работы построены модели трех типов гидроканалов пенокерамического фильтра. Самая простая модель гидроканала состоит из последовательного соединения выпуклых сферических частей (пор) ( $d = 0,05$  м) вогнутыми перешейками, диаметр которых  $d = 0,002$  м (рис. 2).

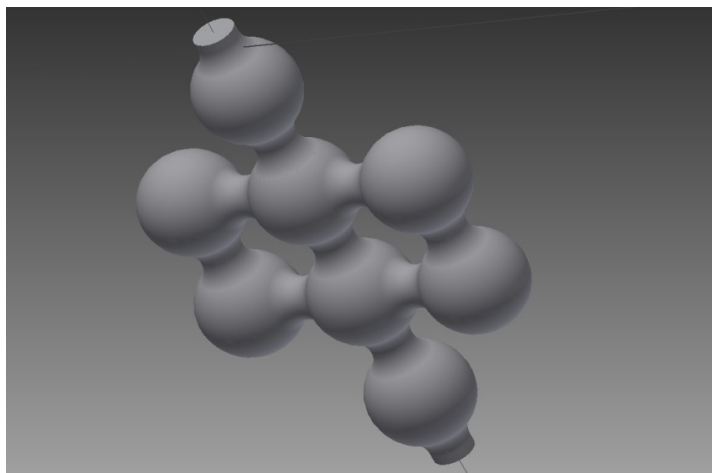


**Рис. 2.** Последовательное соединение пор фильтра

Построены модели и двух более сложных гидроканалов: зигзагообразное соединение пор и перешейков (рис. 3) и разветвленное соединение (рис. 4).



**Рис. 3.** Зигзагообразная модель гидроканала



**Рис. 4.** Разветвленная модель гидроканала

Все эти примеры гидроканалов соединяются один с другим и образуют цельный фильтр. Для последующего моделирования рекомендуется использовать данные элементарные модели. Построения проводились в программе Autodesk Inventor Professional 2014.

**Моделирование процесса движения частиц расплава в гидроканалах.** Для понимания характера движения частиц жидкости необходимо провести моделирование в программе Star-CCM+. Исходные данные:

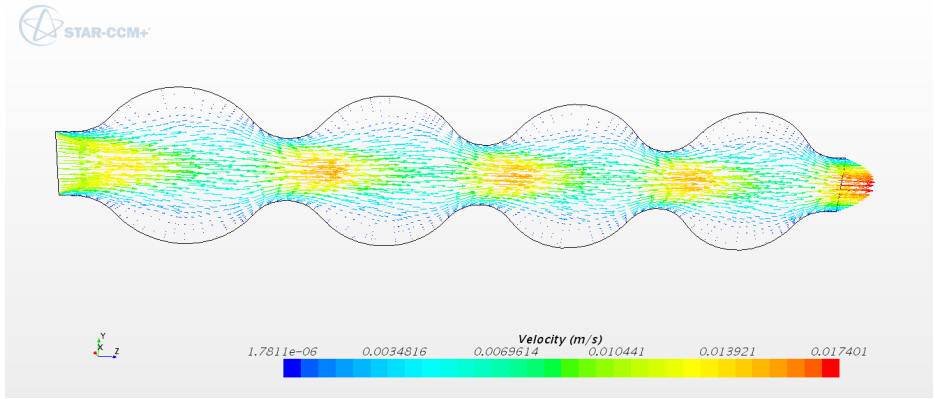
скорость течения расплава, м/с .....	0,01
плотность расплава стали У8, кг/м <sup>3</sup> .....	7800
вязкость, м <sup>2</sup> /с .....	$0,64 \cdot 10^{-6}$
температура, °С .....	1500

В процессе моделирования получено:

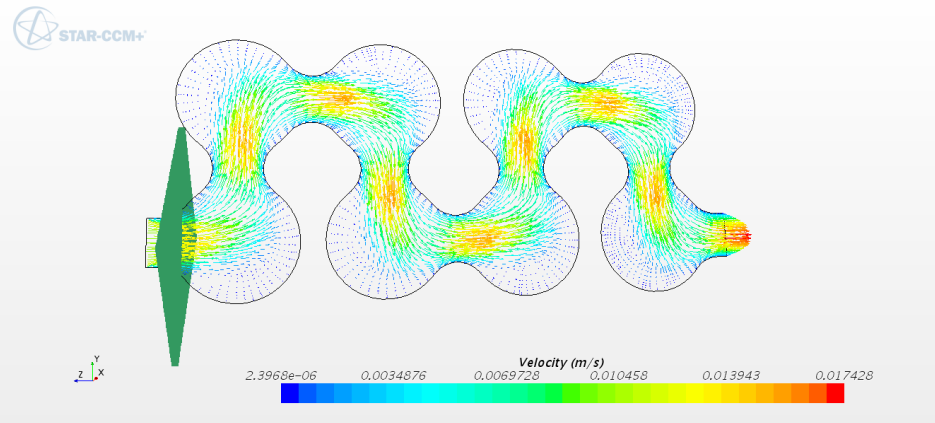
Распределение скоростей движения частиц расплава по всем сечениям гидроканалов (рис. 5, а–в).

Поскольку фильтр состоит из последовательности пор больших сферических и малых вогнутых, то скорость частиц расплава во всех трех типах гидроканалов непрерывно изменяется при движении через них. Скорость потока вблизи сферических поверхностей понижается до значения  $1,78 \cdot 10^{-6}$  м/с, и увеличивается по мере приближения к оси поры. В узких перешейках гидроканалов происходит увеличение скорости движения частиц до значения 0,0174 м/с.

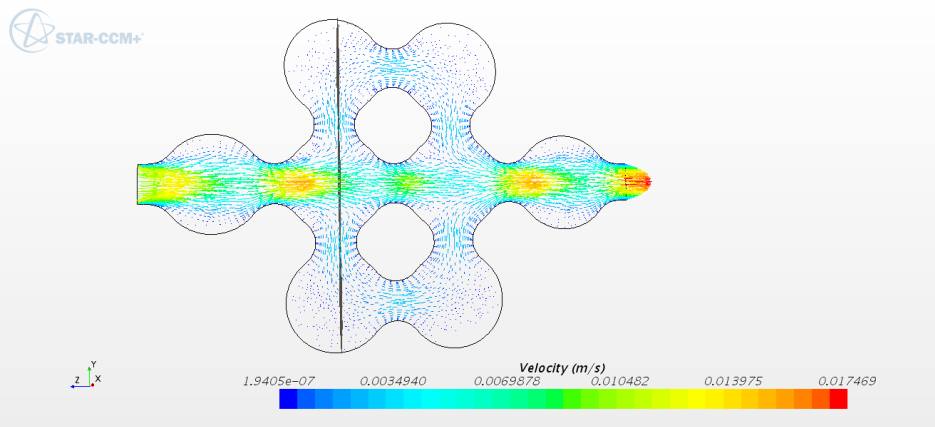
Следует отметить, что скорость движения частиц в разветвленном соединении пор гидроканала, а именно в порах, которые находятся по обе стороны от основной оси, практически не изменяется по всему сечению, т. е. остается порядка  $28 \cdot 10^{-5}$  м/с.



*a*



*б*

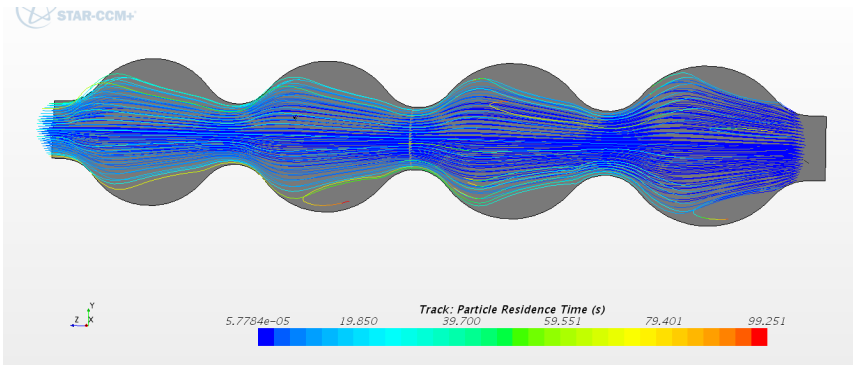


*в*

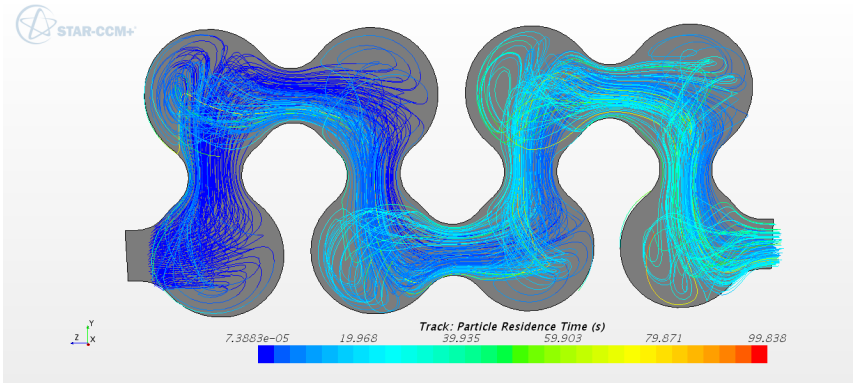
**Рис. 5.** Распределение скоростей движения частиц расплава стали марки У8:

*a* — в последовательном соединении пор гидроканала; *б* — в зигзагообразном соединении пор гидроканала; *в* — в разветвленном соединении пор гидроканала; на шкале указана скорость  $v$ , м/с

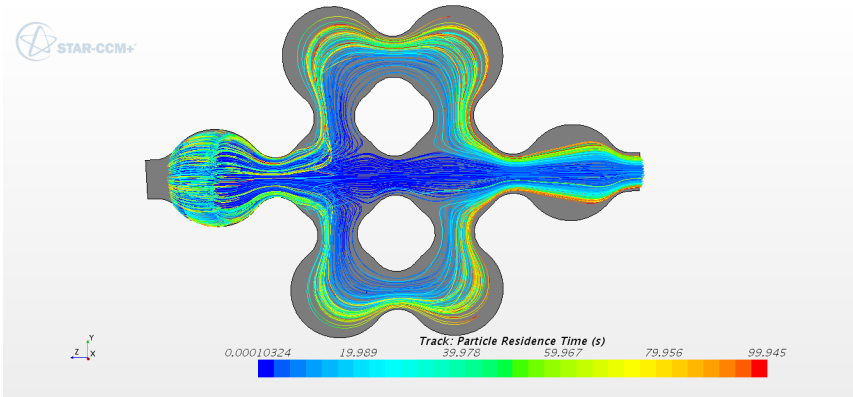
Получено время пребывания частиц в порах гидроканала от момента попадания их в фильтр (рис. 6, а–в). Выявляется зависимость, что самое долгое пребывание частиц расплава наблюдается вблизи сферических поверхностей. При этом время пребывания частиц в гидроканале уменьшается по мере приближения к оси.



а



б

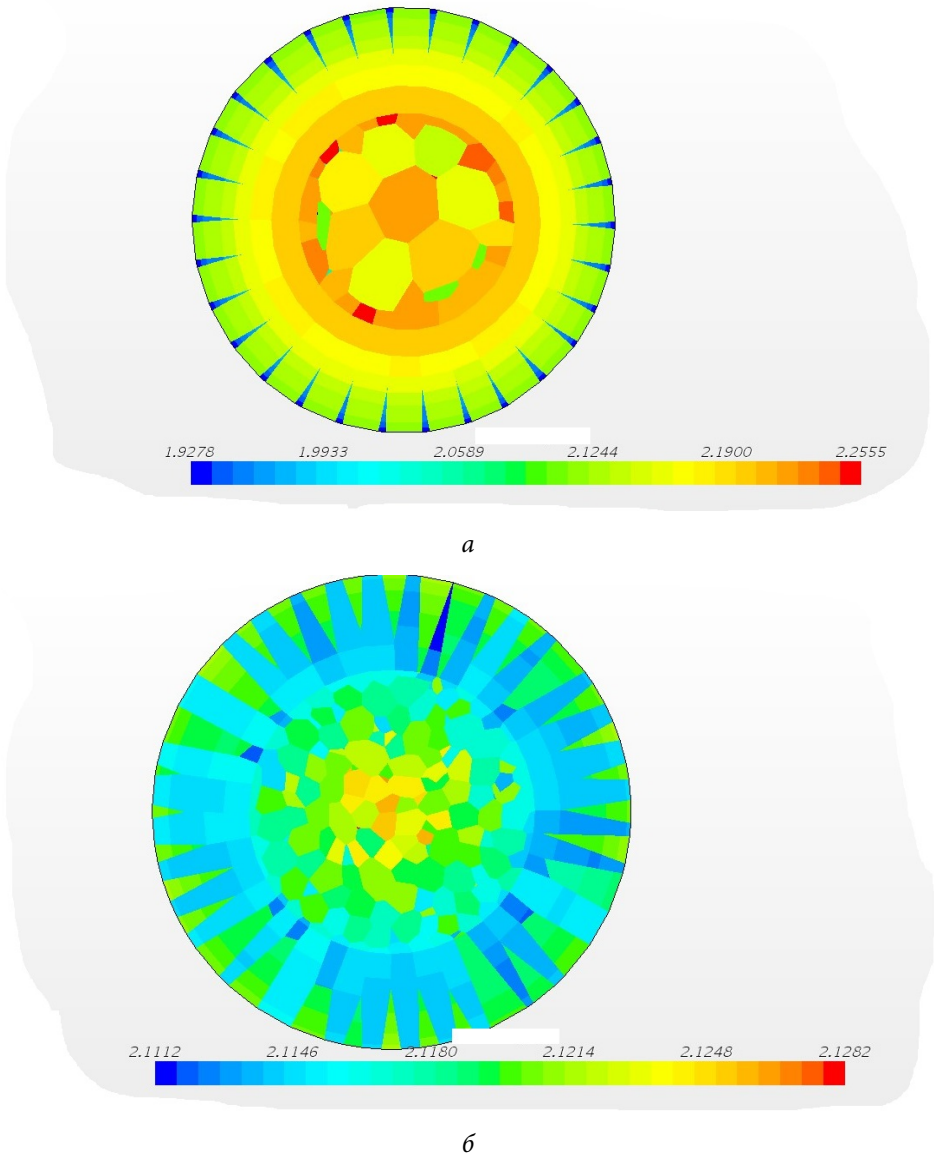


в

**Рис. 6.** Время пребывания частиц в порах гидроканала от момента их попадания в канал: а — в последовательном соединении пор гидроканала; б — в зигзагообразном соединении пор гидроканала; в — в разветвленном соединении пор гидроканала; на шкале указано время  $t$ , с

В разветвленном гидроканале наблюдается максимальное время задерживания частиц в ответвленных порах, поскольку там происходит падение скоростей по всему сечению канала.

Определено давление потока частиц в гидроканале (рис. 7, а, б). При движении потока частиц в гидроканале возникает давление, которое у поверхности сферических пор имеет минимальное значение. Давление увеличивается по мере приближения к оси пор гидроканала и достигает максимального значения



**Рис. 7.** Распределение давления потока частиц в поперечных сечениях гидравлических каналов (последовательное соединение пор):

*a* — в перешейке ( $d = 0,002$  м); *б* — в сферической поре ( $d = 0,005$  м); на шкале указано давление  $p$ , Па



в центре узких перешейков. Такая зависимость распределения давления прослеживается во всех трех моделях гидроканалов. Для примера взяты сечения последовательного гидроканала. На рис. 6 приведено распределение давлений в поперечном сечении больших пор и маленьких перешейков в последовательном соединении пор гидроканала.

Таким образом, наиболее благоприятные места оседания частиц соединения серы будут происходить в местах с меньшими скоростями и с меньшими значениями давления потока, а именно на сферических поверхностях пор. Для оседания неметаллических частиц, кроме того, должна обеспечиваться хорошая смачиваемость этими частицами материала фильтра, а площадь фильтра должна гарантировать заполнение литейной формы металлом за оптимальное время.

**Силы, действующие на частицы разных размеров и форм.** Размеры и форма неметаллических частиц имеют разнообразные значения и варианты. В сплаве могут находиться частицы размером от 1 до 100 мкм. На неметаллические частицы в процессе движения действует сила давления от частиц железа, углерода и примесей. Значение этого давления зависит от формы и размеров соединений серы, а также и от скорости движения потока.

В настоящей работе рассматриваются два типа форм частиц: частицы в форме монеты (диаметр частиц  $d = 1 \dots 100$  мкм) и частицы сферической формы, имеющие такой же диапазон диаметров. Положение закрепленных частиц в виде монеты на поверхности пор фильтра может быть различным. Рассмотрим два варианта закрепления: ребром по направлению движения потока, и против, т. е. плоская часть будет принимать на себя весь поток. Силу давления для плоской поверхности монеты находим по формуле

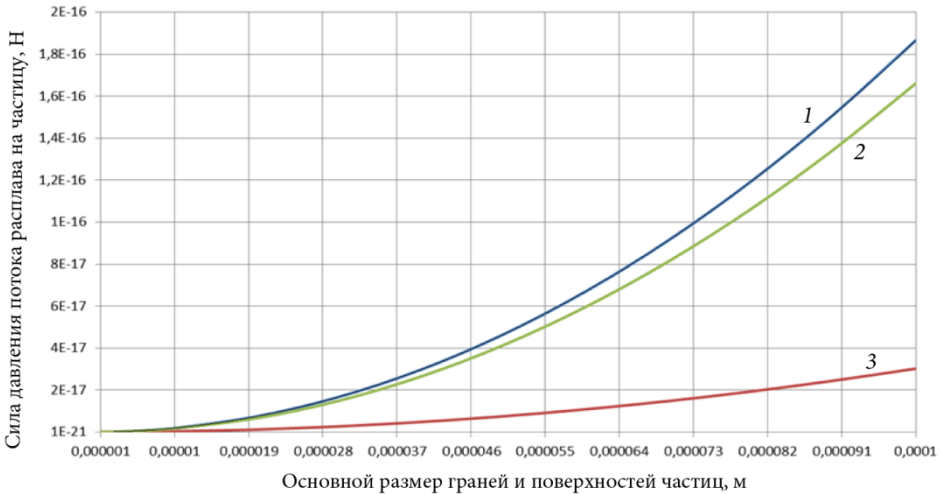
$$P = \rho S v^2,$$

где  $\rho$  — плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  — площадь поверхности частицы, м<sup>2</sup>;  $v$  — скорость движения расплава, м/с.

В результате расчета получено следующее. Максимальная сила, действующая на частицу, приходится на частицы в форме монеты, стоящие плоской круглой гранью против движения потока. Узкая грань частицы в виде монеты воспринимает самые малые силы, поскольку имеет самую маленькую площадь соприкосновения с потоком. Среднее же значение сил получают частицы сферической формы (рис. 8).

**Критерий фильтрации частиц.** В процессе пропускания расплава стали марки У8 через пенокерамический фильтр происходит оседание неметаллических частиц соединений серы и фосфора на сферических поверхностях фильтра. Между материалом фильтра и неметаллическими частицами возникает сила адгезии, которая обусловлена силами межмолекулярного взаимодействия. Сила адгезии максимальна при полном структурном и размерном соответствии кристаллических решеток неметаллических частиц и оксида алюминия [7]. При неполном структурном и размерном соответствии энергия адгезии понижается и

становится нулевой, если примесные элементы сера и фосфор не образуют твердых частиц с модифицирующей добавкой при температурах фильтрации и полностью растворены в расплаве [8]. Если сила давления на частицу превышает силу адгезии, то происходит отрыв в области спайки частицы. Также частицы не будут оседать при турбулентном режиме, поскольку сила действия на частицы будет велика.



**Рис. 8.** Зависимость сил, действующих на частицы, от основного размера частиц. Давление на сферическую поверхность частицы, плоскую круглую и на узкую грань ( $V_{\text{входа}} = 0,01$  м/с,  $V_{\text{граница}} = 1,78E-6$  м/с):

1 — круглая плоская поверхность; 2 — сферическая частица; 3 — узкая грань частицы

Таким образом, критерий фильтрации неметаллических соединений серы и фосфора, при пропускании расплава через пенокерамический фильтр следующий. Сила действия на частицы от потока движущихся частиц железа и легирующих элементов не должна превышать силу адгезии между неметаллическими частицами и материалом фильтра.

**Выводы.** Исследование макроструктуры пенокерамического фильтра показало, что фильтр имеет ретикулярную структуру и представляет собой чередование сферических пор и перешейков. Фильтрацию расплава следует проводить при невысоких скоростях в условиях ламинарного режима течения. Проведено моделирование движений частиц расплава стали марки У8 в гидравлических каналах трех типов: последовательного соединения пор, зигзагообразного соединения и разветвленного. Выявлено, что наиболее благоприятными местами для оседания твердых соединений примесей серы и фосфора являются сферические поверхности, так как около этих поверхностей скорости имеют невысокие значения, происходит задерживание частиц от момента попадания в канал и имеются низкие давления. Получен критерий фильтрации частиц, согласно ко-

торому силы, действующие на частицы от потока железа и легирующих элементов, не должны превышать силу адгезии между частицами примесей и материалом фильтра. В противном случае произойдет отрыв в области спайки частиц с фильтром.

## Литература

- [1] Попов Д.Н., Панайоти С.С., Рябинин М.В. *Гидромеханика*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 237 с.
- [2] Васильев В.А., Чурсин В.М., Бибииков Е.Л. *Физико-химические основы литейного производства*. Москва, Изд-во ООО «Интермет Инжиниринг», 2001, 336 с.
- [3] Арзамасов В.Б., Волчков А.Н., Головин В.А., Кузнецов В.А., Смирнова Э.Е., Черепашин А.А., Шлыкова А.В., Шпунькин Н.Ф. *Материаловедение и технология конструкционных материалов*. Москва, Издательский центр Академия, 2007, 448 с.
- [4] Гузман И.Я. *Высокоогнеупорная пористая керамика*. Москва, Металлургия, 1971, 208 с.
- [5] Иванов В.Н. *Словарь-справочник по литейному производству*. Москва, Машиностроение, 1990, 384 с.
- [6] Циммерман Р., Гюнтер К. *Металлургия и материаловедение*. Москва, Металлургия, 1982, 480 с.
- [7] Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Войткун Ф. *Материаловедение*. Москва, МИСИС, 1999, 600 с.
- [8] Кудрин В.А. *Металлургия стали*. Москва, Металлургия, 1981, 488 с.
- [9] Балкевич В.Л. *Техническая керамика*. Москва, Стройиздат, 1968, 200 с.
- [10] Рабинович Е.З. *Гидравлика*. Москва, Недра, 1980, 325 с.

**Стоякина Екатерина Александровна** — студентка кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Дегтярева Алла Григорьевна** — ассистент кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — В.Н. Симонов, д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## MECHANISM OF REMOVING SULFUR AND PHOSPHORUS FROM MOLTEN STEEL U8 BY FILTRATION THROUGH FOAM CERAMICS

E.A. Stoyakina  
A.G. Degtyareva

safronova.e@me.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

*The article considers the mechanism of physico-chemical processes of filtration of solid sulphur and phosphorus compounds in molten steel U8 flowing through porous ceramics. We studied the structure of porous filter channels and built the 3D-model of filter hydraulic channels, in which the molten mass moves. Furthermore, we carried out the simulation of motion of compound impurities in hydraulic channels. As a result, we identified the surfaces of hydraulic channels, where particulate contamination is expected. Finally, we found the forces acting on particles of different sizes and shapes, depending on the flow of molten steel and obtained the particle filter criterion.*

### Keywords

*Filtration, foam ceramics, macroscopic structure, modeling, hydraulic channel, adhesion*

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

### References

- [1] Popov D.N., Panaiotti S.S., Ryabinin M.V. *Gidromekhanika [Hydromechanics]*. Moscow, Bauman Press, 2002, 237 p.
- [2] Vasil'yev V.A., Chursin V.M., Bibikov E.L. *Fiziko-khimicheskie osnovy liteynogo proizvodstva [Physics-chemical fundamentals of foundry production]*. Moscow, Internet Inzhiniring publ., 2001, 336 p.
- [3] Arzamasov V.B., Volchkov A.N., Golovin V.A., Kuznetsov V.A., Smirnova E.E., Cherepakhin A.A., Shlykova A.V., Shpun'kin N.F. *Materialovedenie i tekhnologiya konstruktsionnykh materialov [Material engineering and construction materials technology]*. Moscow, Izdatel'skiy tsentr Akademiya, 2007, 448 p.
- [4] Guzman I.Ya. *Vysokoogneupornaya poristaya keramika [High-refractory porous ceramics]*. Moscow, Metallurgiya publ., 1971, 208 p.
- [5] Ivanov V.N. *Slovar'-spravochnik po liteynomu proizvodstvu [Glossary on foundry production]*. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990, 384 p.
- [6] Tsimmerman R., Gyunter K. *Metallurgiya i materialovedenie [Metallurgy and material engineering]*. Moscow, Metallurgiya publ., 1982, 480 p.
- [7] Solntsev Yu.P., Pryakhin E.I., Voytkun F. *Materialovedenie [Material engineering]*. Moscow, MISIS publ., 1999, 600 p.
- [8] Kudrin V.A. *Metallurgiya stali [Steel metallurgy]*. Moscow, Metallurgiya publ., 1981, 488 p.
- [9] Balkevich V.L. *Tekhnicheskaya keramika [Technical ceramics]*. Moscow, Stroyizdat publ., 1968, 200 p.
- [10] Rabinovich E.Z. *Gidravlika [Hydraulics]*. Moscow, Nedra publ., 1980, 325 p.

**Stoyakina E.A.** — student, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Degtyareva A.G.** — Assistant, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — V.N. Simonov, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.