

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

*Михайлов А.Ю., Петровский Э.А.*

*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

**Ключевые слова:** критерий Нуссельта, перемешивающие устройства, теплопередача стенок, эффективность мешалок, коэффициент теплоотдачи, процесс добычи.

**Аннотация.** Показаны основные виды перемешивающих устройств механического типа. В зависимости от вида перемешивающей жидкости выбирается оптимальная конструкция мешалки. Эффективность перемешивания оценивают с помощью коэффициента теплопередачи или критерия Нуссельта. Модернизация перемешивающих устройств в горнодобывающей промышленности является важным шагом для улучшения эффективности и качества процесса добычи полезных ископаемых.

## INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE BY STIRRING

*Mikhailov A.Yu., Petrovsky E.A.*

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

**Keywords:** Nusselt criterion, mixing devices, wall heat transfer, agitator efficiency, heat transfer coefficient, extraction process.

**Abstract.** The main types of mechanical mixing devices are shown. Depending on the type of mixing liquid, the optimal design of the agitator is selected. The mixing efficiency is evaluated using the heat transfer coefficient or the Nusselt criterion. The modernization of mixing devices in the mining industry is an important step to improve the efficiency and quality of the mining process.

**Введение.** Горнодобывающая промышленность играет важную роль в экономике многих стран, обеспечивая производство ценных полезных ископаемых. Для успешной работы горнодобывающих предприятий необходимо использовать эффективные и надежные перспективные перемешивающие устройства. Они позволяют достичь оптимальных результатов в обработке горных пород и повысить общую эффективность процесса добычи.

Одним из самых распространенных видов перемешивающих устройств в горнодобывающей промышленности являются промышленные смесители. Они широко применяются для гомогенизации горных пород, достижения требуемой консистенции и качества сырья. Примером таких смесителей являются барабанные смесители, роторные смесители и планетарные смесители.

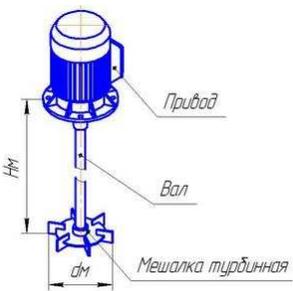
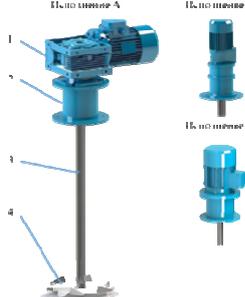
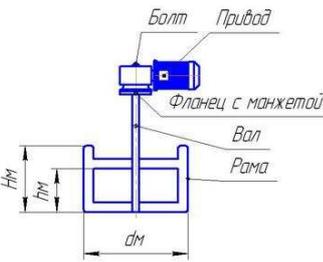
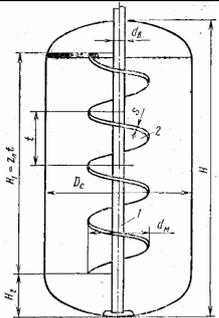
Барабанные смесители являются наиболее простыми и недорогими в использовании. Они состоят из горизонтально расположенного барабана, в котором происходит перемешивание материалов. Барабанные смесители позволяют обрабатывать большие объемы горных пород за короткое время.

Роторные смесители отличаются высокой интенсивностью перемешивания и хорошей гомогенизацией материалов. В основе их работы лежит вращение горизонтального ротора, оборудованного лопастями, которые переключают материалы с одного конца смесителя на другой. Это позволяет обеспечить равномерное перемешивание горных пород и получение качественного продукта.

Планетарные смесители являются одними из самых эффективных среди всех видов перемешивающих устройств. Они обладают высокой мощностью, могут обрабатывать большие объемы материалов и обеспечивать качественное перемешивание. Работают по принципу планетарного движения, при котором материалы перемещаются в разных направлениях, обеспечивая их полное перемешивание.

В зависимости от вида перемешиваемой жидкости выбирается оптимальная конструкция мешалки (табл. 1). Эффективность перемешивания оценивают с помощью коэффициента теплопередачи или критерия Нуссельта.

Табл. 1. Виды перемешивающих устройств [2]

№	Название мешалок	Вид	Уравнение	Преимущества +. Недостатки –.
1	Турбинные		<p>Теплоотдача от стенки сосуда к жидкости</p> $Nu = 0.40 Re^{2/3} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0.14}$ <p>Теплоотдача от стенки сосуда к жидкости</p> $Nu = 1.01 Re^{0.62} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0.14}$	<p>+ быстроходность, + высокая эффективность, + малый пусковой момент; – сравнительная сложность, – высокая стоимость изготовления</p>
2	Фрезерные		<p>Коэффициент теплоотдачи</p> $Nu = 0.18 \left( \frac{d_u}{t} \right)^{-0.54} \left( \frac{h}{t} \right)^{-0.14} Re^{0.65} Pr^{0.4}$	<p>+ недороги, + простота в изготовлении, + надежность; – небольшой спектр использования</p>
3	Рамные		<p>Коэффициент теплоотдачи: К наружной стенке</p> $\frac{Re \cdot D_s}{H} \leq 21 \quad Nu = 7.6 \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0.14}$ <p>К внутренней стенке</p> $\frac{Re \cdot D_s}{H} \leq 21 \quad Nu = 3.6 \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0.14}$	<p>+ простота устройства, + невысокая стоимость изготовления; – низкое насосное действие мешалки (слабый осевой поток), – лопастные мешалки перемешивают только те слои жидкости, которые находятся в непосредственной близости от лопастей мешалки</p>
4	Шнековая		<p>Теплоотдача от стенки сосуда к жидкости</p> $Nu = 0.74 Re^{2/3} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0.14}$ <p>Теплоотдача от жидкости к стенке змеевика</p> $Nu = 1.19 Re^{0.62} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0.14}$	<p>+ равномерное распределение по всему объему; – сложность конструкции</p>

Расчет коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  от перемешиваемой жидкости к стенке в ряде случаев затруднителен, так как известные опытные данные по теплообмену не всегда достаточны [1].

Теплоотдача в цилиндрических аппаратах при вынужденном движении жидкости определяется известной критериальной зависимостью:

$$Nu = f(Re_{\psi}; Pr). \quad (1)$$

Для описания процесса теплоотдачи при перемешивании жидкости механическими мешалками обычное выражение критерия Рейнольдса заменяется на Рейнольдс центробежный ( $Re_{\psi}$ ):

$$Nu = A \cdot Re_{\psi}^a \cdot Pr^b. \quad (2)$$

Критерий Нуссельта является соотношением между интенсивностью теплопередачи и напряжением температурного поля в пограничном слое потока теплоносителя. Определяющим геометрическим размером в критерии Нуссельта считают в последнее время диаметр мешалки.

Модернизация перемешивающих устройств в горнодобывающей промышленности является важным шагом для улучшения эффективности и качества процесса добычи полезных ископаемых. Многие предприятия активно внедряют новые технологии и устройства, чтобы повысить свою конкурентоспособность и улучшить экономические показатели [3].

Примером модернизации перемешивающих устройств в горнодобывающей промышленности может служить внедрение системы автоматического управления перемешивающими устройствами. Это позволяет значительно улучшить точность и стабильность процесса перемешивания, а также снизить затраты на обслуживание и ремонт оборудования.

**Заключение.** В исследованиях, проведенных в данной области, было показано, что использование современных перемешивающих устройств способствует повышению производительности горнодобывающих предприятий. Например, исследование, проведенное в Китае, показало, что применение планетарных смесителей в добыче угля позволило увеличить производительность на 20% и снизить затраты на энергию на 15%.

Успешные примеры внедрения новых технологий и перемешивающих устройств в горнодобывающей промышленности можно найти в различных странах мира. Например, в Австралии были внедрены инновационные системы для перемешивания горных пород, которые позволили повысить эффективность добычи железной руды на 25%.

Таким образом, разнообразие перспективных перемешивающих устройств для горнодобывающей промышленности играет важную роль в обеспечении эффективности и качества процесса добычи полезных ископаемых. Использование таких устройств, как барабанные смесители, роторные смесители и планетарные смесители, позволяет достичь оптимальных результатов в обработке горных пород. При этом необходимо учитывать возможность модернизации устройств и внедрения новых технологий, что позволит улучшить процесс добычи и повысить конкурентоспособность предприятий горнодобывающей промышленности.

### **Список литературы**

1. Перспективы развития горнодобывающей промышленности в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mining-media.ru/ru/article/intervyu/17884-o-perspektivakh-gornoj-promyshlennosti-v-2023-godu>.
2. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – Ленинград: Госэнергоиздат, 1958. – 562 с.
3. Аброськин А.С. Применение современных систем автоматизации на открытых горных работах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, №12. – С. 122-130.

### Сведения об авторе:

*Михайлов Артем Юрьевич* – аспирант;

*Петровский Эдуард Аркадьевич* – д.т.н., профессор кафедры ТМиОНГК.