

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ТВЕРДОЙ СЕРЫ

П.В. Яковлев

*Кафедра безопасности жизнедеятельности и гидромеханики,
ФГОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: плавление; сера; тепломассообмен.

Аннотации: Предложена модель, описывающая процесс теплообмена при плавлении твердой серы в ванне с расплавом. Изучены вопросы движения и особенности тепломассообмена расплава серы в зоне загрузки твердой серы. Исследовано взаимодействие расплава и твердых частиц при различных параметрах работы загрузочного устройства, температурах и размерах частиц. Получены зависимости, определяющие интенсивность теплообмена в изученном диапазоне изменения влияющих параметров, и условия отсутствия слипания частиц в объеме расплава.

Обозначения

$G_{\text{тв}}$ – массовый расход твердой серы, кг/с;	τ – время, с;
g – ускорение свободного падения, м/с ² ;	ω – скорость движения расплава серы, м/с;
u – скорость движения твердой серы, м/с;	ρ – плотность, кг/м ³ ;
m – масса, кг;	ξ – коэффициент линейного сопротивления.
F – сила, Н;	
h – высота от свободной поверхности расплава до загрузочного устройства, м;	Индексы
R – радиус, м;	f – среднее значение параметров жидкости;
X – вертикальная координата, м;	p – давление.

При проведении экспериментов по плавлению серы в расплаве наблюдалось явление слипания твердых частиц в зоне загрузки аппарата. Следствием этого становится снижение производительности устройства. Учитывая, что точечный контакт частиц не может привести к образованию прочных механических связей, была выдвинута гипотеза о возможности охлаждения расплава в зоне загрузки до температуры фазового перехода.

Среди факторов, определяющих процесс тепломассообмена, следует выделить исходные температуры расплава и твердой фазы, ее фракционный состав, высоту свободного падения относительно поверхности расплава, массовый расход и геометрические размеры фронта загрузки ванны. Предложена модель, учитывающая движение частиц и их влияние на движение самого расплава в емкости. Зона взаимодействия частиц серы с расплавом представляет собой объем, ограниченный в горизонтальном направлении размерами загрузочного устройства и дном плавильной емкости, а также вертикальными поверхностями, проходящими через периметр зоны загрузки, в пределах которого происходит свободное осаждения частиц твердой фазы.

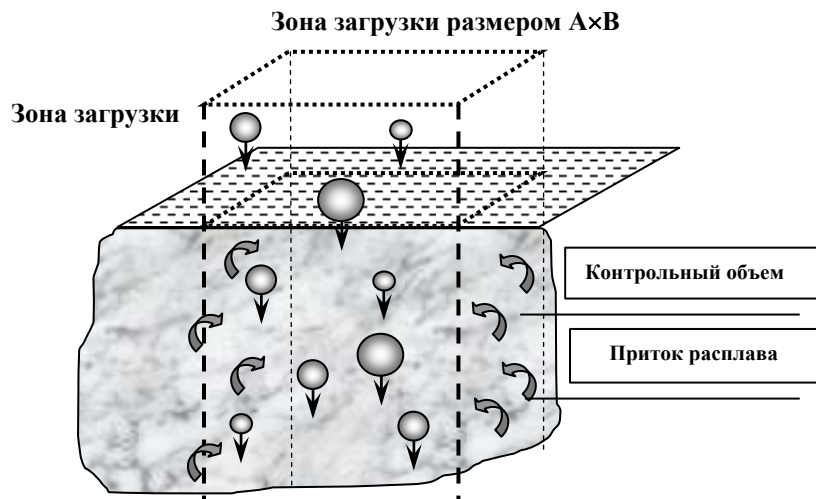


Рис. 1 Модель движения твердых частиц в плавильной емкости

Взаимодействие частиц и расплава может рассматриваться как движение теплоносителей по схеме прямоток. Частицы, опускаясь вниз, заставляют перемещаться в том же направлении и расплав. Изменение скорости движения расплава происходит за счет его притока через боковые грани зоны. Расчетная схема модели движения и расплава в плавильной емкости представлена на рис. 1.

Скорость движения частиц определяется из известных законов механики

$$u = u_{x=0} + \frac{\sum F}{m} \tau = \frac{mg - F_p}{m} \tau. \quad (1)$$

Учитывая, что сила тяжести действует совместно с силой Архимеда, а также применяя зависимость для расчета силы гидродинамического сопротивления, получим

$$u = u_{x=0} + \frac{(\rho - \rho_f) g \frac{4}{3} \pi R^3 - \pi R^2 \rho_f \xi \frac{u^2}{2}}{\frac{4}{3} \pi R^3 \rho} \tau. \quad (2)$$

Учитывая скорость движения расплава, вызванного движением частиц, сопротивление будет определяться разностью скорости частиц u и скорости потока ω

$$du = \left(\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right) g - \frac{3}{8R} \frac{\rho_f}{\rho} \xi (u - \omega)^2 \right) d\tau. \quad (3)$$

Движение жидкости определяется из закона сохранения энергии и включает изменение кинетической энергии потока, определяемое работой сил гидродинамического сопротивления движения частиц. Влияние сил трения при движении расплава вблизи стенок емкости не учитываем, так как градиент скорости в подавляющем большинстве реальных объектов пренебрежимо мал. Обозначив скорость движения расплава через ω , получим следующую расчетную зависимость для движения жидкости

$$F_p dx = \frac{3}{4R} \frac{\rho_f}{\rho} \xi \frac{u^2}{2} G_{\text{ТВ}} dx. \quad (4)$$

Преобразуя составляющую изменения кинетической энергии применительно к выделенному расчетному объему, а также учитывая, что для расчетного объема с размерами в горизонтальной плоскости $A \times B$ изменение массового расхода расплава находится из материального баланса

$$d\left(m \frac{\omega^2}{2}\right) = AB\rho_f d\omega \frac{\omega^2}{2} + AB\rho_f \omega^2 d\omega = 1,5 AB\rho_f \omega^2 d\omega. \quad (5)$$

Используя полученные в результате преобразований зависимости, получаем итоговое уравнение для изменения скорости движения расплава в пределах выделенного объема с учетом поправки на скорость движения расплава

$$\omega^2 d\omega = \left(\frac{\xi(u - \omega)^2}{4R\rho} \frac{G_{ТВ}}{AB} \right) dx. \quad (6)$$

Нелинейность задачи обусловлена изменением скорости движения частиц твердой фазы u и ее связью со скоростью потока ω . Аналитическое решение такого уравнения представляет значительные математические трудности. В связи с этим, решение получено численным методом. Приняты следующие граничные условия:

$$u_{x=0} = \sqrt{mgh}; \quad \omega_{x=0} = 0. \quad (7)$$

Начальные условия используют допущение о постоянстве температур твердой фазы и расплава:

$$T_{\tau=0} = T_0; \quad T_{\tau=0}^f = T_0^f.$$

Исследования проведены для режимов работы плавильного устройства в диапазоне:

- высота загрузки – 0,1...0,5 м;
- производительность загрузочного устройства – 10...100 кг/(с·м²);
- диаметр частиц – 2...200 мм;
- температура расплава – 130...155 °С;
- температура твердой фазы – 10...60 °С.

Проверка модели выполнена на решении задачи свободного осаждения и сопоставления с имеющимися результатами экспериментальных исследований.

В результате выполненных расчетов выявлен сложный характер движения частиц и самого расплава. Это определяется значительным числом определяющих параметров.

На скорость движения расплава по глубине влияют, прежде всего, размер частиц и высота их свободного падения. На рис. 2 приведена зависимость скорости расплава для плотности загрузки 10 кг/(с·м²) и значения определяющего размера частиц ($d = 4$ мм) при различных высотах выгрузки.

Как видно из графика, скорость движения расплава интенсивно возрастает в поверхностном слое, затем ее рост стабилизируется на глубине 0,6...0,8 м. Характер движения зависит от размера частиц и высоты их падения. Как показали исследования, для размера частиц 8 мм и высоты выгрузки 0,1 м скорость движения значительно ниже, чем для других режимов работы загрузочного устройства. Для размера частиц 20 мм этого различия не наблюдается.

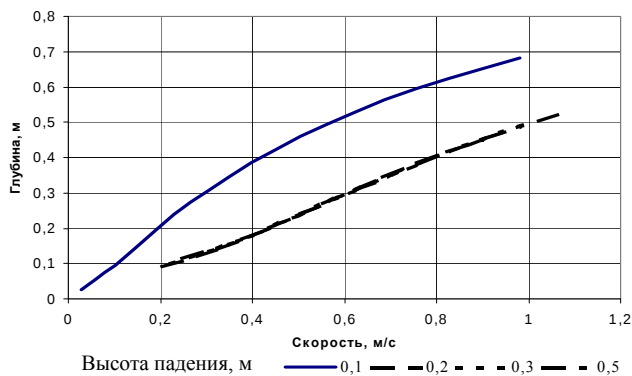


Рис. 2 Зависимость скорости движения расплава по глубине ($d = 4$ мм)

На рис. 3 представлена зависимость скорости частиц по глубине для различных высот выгрузки частиц диаметром 4 мм в условиях, соответствующих представленному выше графику изменения скорости движения расплава.

Как видно из графика, для больших высот характер движения частиц определяется двумя факторами: кинетической энергией, приобретаемой частицей при свободном падении, и, как следствие, большей скоростью в поверхностном слое, а также влиянием сил трения самой жидкости. Для обычного седиментационного осаждения профиль скорости должен асимптотически приближаться к расчетной скорости. Приведенные расчетные зависимости показывают, что начальный участок движения частиц в расплаве действительно характеризуется снижением скорости, а затем начинается ее увеличение. Причина этого роста заключается в одновременном движении расплава в направлении, совпадающем с направлением движения частиц.

Обработка результатов расчетов работы устройства в различных режимах позволила найти границы зоны движения частиц с малым влиянием эффекта свободной поверхности расплава на характер движения жидкости. Анализ факторов, определяющих изученное явление, позволил выделить наиболее значимые: кинетическую энергию загружаемых частиц с заданным массовым расходом, реакцию свободной поверхности жидкости при взаимодействии с частицами и силу трения в жидкости. Для анализа условий появления эффекта замедления частиц на свободной поверхности расплава предложено использовать критерии Рейнольдса и Фруда. Учитывая зависимость скорости движения от массового расхода твердой

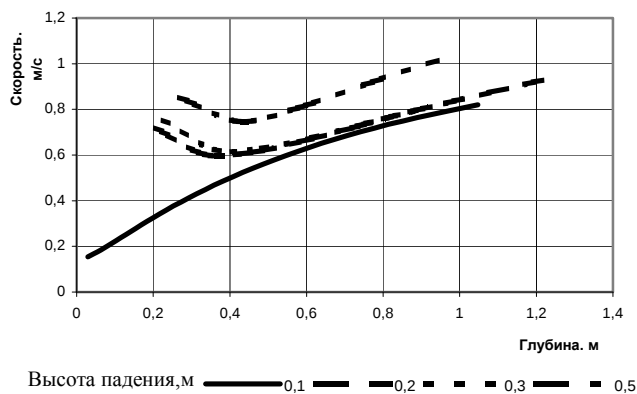


Рис. 3 Скорость движения частиц по глубине ($d = 4$ мм)

фазы, предложено модифицированное значение числа Рейнольдса. Из гидродинамического анализа следует, что присоединенная масса прямо пропорциональна массовому расходу загружаемого материала, в связи с чем можно принять $\rho \approx \frac{G}{u}$, что позволяет представить число Рейнольдса в виде

$$\text{Re} = \frac{ud\rho}{\mu} \approx \frac{Gd}{\mu}. \quad (8)$$

Учитывая, что скорость частиц у поверхности определяется высотой свободного падения и равна $u = \sqrt{2gh}$, число Фруда для границы свободной поверхности можно найти по формуле

$$\text{Fr} = \frac{u^2}{gl} = \frac{2h}{d}. \quad (9)$$

Такое преобразование позволило обобщить полученные результаты по исследуемому явлению взаимодействия частиц с поверхностью. При малых числах Фруда движение частиц у поверхности имеет значительную неустойчивость. Дальнейший рост числа Fr характеризуется наступлением стабилизации.

Анализ полученных результатов позволяет установить зону стабильного движения частиц без их слипания в следующих границах:

$$\text{Fr} < 100; \quad \text{Re} > 35.$$

Фактически это обусловлено тем, что поверхность жидкости не оказывает существенного влияния на движение частицы при больших высотах падения (число Fr) и значительных массовых расходах (число Re).

В результате исследования теплообмена выявлено наличие двух режимов движения частиц, отличающихся законами изменения коэффициентов теплоотдачи.

Увеличение числа Re приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи. При $\text{Re} = 3,3$ выделяются две группы кривых, соответствующие двум режимам, определяемым уровнем влияния свободной поверхности жидкости. При $\text{Re} = 6,7$ наблюдается разделение с последующей стабилизацией и выходом на автомодельный режим. При $\text{Re} = 50$ такого разделения не наблюдается вообще. Такое разделение потребовало выполнения анализа влияния определяющих параметров раздельно для каждого из режимов. Как отмечалось выше, в диапазоне чисел Рейнольдса от 6 до 35 наблюдалось неустойчивое движение твердых частиц с высоким уровнем неопределенности. Аналогичная проблема наблюдается и для условий теплообмена. В связи с этим, в отмеченном диапазоне чисел Рейнольдса не было получено достоверных зависимостей, описывающих изменение коэффициента теплоотдачи по высоте.

Для расчета коэффициента теплоотдачи предложено уравнение вида

$$\text{Nu} = aX^n, \quad (10)$$

где X – безразмерная координата, выражающая отношение диаметра частиц к глубине.

При числах $\text{Re} < 3,3$ коэффициенты в уравнении (10) рассчитываются по формулам:

$$a = 0,0043 \text{Re} + 0,8471; \quad n = -0,0008 \text{Re}^2 + 0,0153 \text{Re} - 0,2938. \quad (11)$$

При числах $Re > 35$ коэффициенты в уравнении (10) рассчитываются по формулам:

$$a = 0,4168 \cdot \ln Re - 0,1535; \quad n = -8 \cdot 10^{-6} \cdot Re^2 + 0,0001 Re - 0,1121. \quad (12)$$

Полученные результаты могут быть использованы для конструктивного расчета устройств плавления серы и технологических режимов их устойчивой работы.

Список литературы

- 1 Гельперин, Н.И. Основы техники кристаллизации расплавов / Н.И. Гельперин, Г.А. Носов. – М.: Химия, 1975. – 351 с.
- 2 Зозуля, М.И. Товарные виды серы. Проблемы хранения и обработки блочных запасов / М.И. Зозуля, А.П. Салюк, Р.П. Дацко // Обзорн. инф. «Сера и серная промышленность». – М.: НИИТЭхим, 1988. – 98 с.
- 3 Кутателадзе, С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
- 4 Лыков, А.В. Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
- 5 Менковский, М.А. Технология серы / М.А. Менковский, В.Г. Яворский. – М.: Химия, 1985. – 328 с.
- 6 Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и механики жидкости: пер. с англ. / С. Патанкар // Под ред. Е.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

Heat Transfer when Melting Hard Sulphur

P.V. Yakovlev

*Department of Life Safety and Hydromechanics,
Asrakhan State Technical University*

Key words and phrases: melting; sulphur; heat and mass transfer.

Abstract: The model describing the process of heat transfer when melting hard sulphur in a bath with fusion is proposed. Matters of motion and peculiarities of heat and mass transfer of sulphur fusion in the area of hard sulphur loading are studied. Interaction between fusion and hard particles under different parameters of loading device operation, temperature and particles size is studied. Dependencies determining the intensity of heat transfer in the examined range of change of influencing parameters and the lack of particles sticking in the fusion are received.

Wärmeaustausch bei dem Schmelzen des festen Schwefeles

Zusammenfassung: Es ist das Modell, das den Prozess des Wärmeaustausches bei dem Schmelzen des festen Schwefeles in der Wanne mit der Schmelze beschreibt, angeboten. Es sind die Fragen der Bewegung und die Besonderheiten des Wärmemassenaustausch der Schmelze des Schwefeles in der Zone der Ladung des festen Schwefeles studiert. Es ist die Wechselwirkung der Schmelze und der festen Teilchen bei den verschiedenen Parametern der Arbeit der Ladeeinrichtung, der

Temperaturen und der Größen der Teilchen untersucht. Es sind die Abhängigkeiten, die die Intensität des Wärmeaustausches im studierten Umfang der Veränderung der beeinflussenden Parameter und die Bedingungen der Abwesenheit der Teilchenagglutination im Umfang der Schmelze bestimmen, erhalten.

Echange calorifique lors de la fusion du soufre solide

Résumé: Est proposé le modèle décrivant le processus de l'échange calorifique lors de la fusion du soufre solide. Sont étudiés les problèmes du mouvement et les particularités de l'échange calorifique de masse du soufre en fusion dans la zone de la charge du soufre solide. Est étudiée l'interaction du bain de fusion et des particules solides lors de différents paramètres du fonctionnement de l'appareil de charge, des températures et des dimensions des particules. Sont reçues les dépendances définissant l'intensité de l'échange calorifique dans la gamme étudiée du changement des paramètres influençants et les conditions du reste de l'agglomération des particules dans le volume du bain fondu.
