

Д. т. н. С. Я. Давыдов¹ (✉), д. т. н. В. Н. Макаров¹, д. т. н. Г. Г. Кожушко²,
к. т. н. Н. В. Макаров¹, к. т. н. А. В. Угольников¹

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
Екатеринбург, Россия

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»,
Екатеринбург, Россия

УДК 697.343:662.998]:66.047.75

ИННОВАЦИОННЫЙ СПОСОБ АКТИВНОЙ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГОРЯЧИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены температурные режимы стенок трубопроводного пневмотранспорта для перемещения горячих сыпучих материалов и цилиндрических аппаратов в виде трубчатых вращающихся обжиговых печей. Особенность предложенной активной теплозащиты стенок трубопроводного пневмотранспорта и цилиндрических аппаратов заключается в том, что охлаждающий агент движется по винтовой линии вокруг их поверхностей за счет термовихревого эффекта «торнадо». Построена математическая модель снижения температуры текучей среды и стенок цилиндрического аппарата.

Ключевые слова: стенка трубопроводного транспорта, цилиндрические аппараты, горячий сыпучий материал, охлаждающий агент.

Технологические материалы (глинозем, клинкер, агломерат, окатыши, шлак, огарок, спек и др.) имеют высокую начальную температуру (до 1000 °С и выше) [1, 2]. Температура перемещения взрыво- и пожароопасных горячих сыпучих материалов (кальцинированная сода) по трубопроводу в АО «БСК» (Башкортостан) и на Березниковском содовом заводе достигает 160 °С; до такой же температуры прогреваются и стенки трубопровода. На предприятии «ИнКом Энергоцветмет» горячие сыпучие материалы (глинозем) перемещаются с температурой 400 °С; на Нижнетагильском металлургическом комбинате колошниковая пыль из пылеуловителя поступает в летки домны с температурой 170–250 °С; в обжиговом отделении завода по производству легкого заполнителя Норильского ГМК от холодильника обжигового агрегата до бункеров готовой продукции используется вакуумный трубопроводный транспорт азерита с температурой 100 °С; известные вакуумные системы применяются в пневматическом транспорте по трубопроводам разных материалов с температурой до 300 °С.

В зоне сушки вращающейся печи по производству глинозема температура материала не

превышает 200 °С, в зоне кальцинации материал нагревается до 950 °С. В зоне прокаливания материал распределяется в области горящего факела, что создает максимально высокую температуру газов (1400 °С). Это позволяет нагреть шихту до температуры 1250 °С, обеспечивающей переход $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. В зоне охлаждения готовый глинозем охлаждается до 1000 °С. При нормальной работе печи кальцинации температура покидающих ее газов не выше 300 °С, что служит надежным критерием обеспечения оптимальной температуры материала в зоне прокаливания (~1250 °С).

При кальцинации глинозема наибольшая температура корпуса печи (300–400 °С [3]) достигается в зоне спекания. Для улавливания пыли в обжиговых печах предусматривается система пылеулавливающих устройств. Часть пыли вследствие резкого снижения скорости газового потока оседает в загрузочной головке печи, из которой по транспортеру поступает в пылесборник, расположенный под загрузочной головкой. Следующая стадия очистки происходит в мультициклонах, в которых улавливается 65–70 % пыли, а окончательно газы очищаются в электрофильтрах. Температура глиноземной пыли при ее пневматическом подъеме от электрофильтров до приемного бачка вращающейся обжиговой печи цеха кальцинации БАЗ-СУАЛ составляет 200 °С, после печи кальцинации глинозем охлаждается в барабанном холодильнике до 80–120 °С. Температура избыточного воздуха, выбрасываемого из печи в атмосферу, около 300 °С. (Вращающаяся печь для кальцинации



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

глинозема производительностью по гидроксиду алюминия $G = 27$ т/ч. <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=788164>).

Для получения клинкера сырьевая смесь обжигается во вращающейся печи с постепенным нагревом до 1400–1450 °С и последующим охлаждением до 800–1100 °С [3]. В зоне подогрева и дегидратации материал нагревается до 500 °С. При 450–500 °С происходит дегидратация глинистых материалов с выделением в газовую фазу водяных паров. Зона декарбонизации является наиболее напряженной в тепловом отношении, так как в ней кроме нагрева материала до 1000 °С происходит реакция разложения карбонатов с выделением в газовую фазу CO_2 . При температуре материала 1280 °С в обжигаемой сырьевой смеси появляется жидкая фаза в результате плавления алюминатов и алюмоомеферитов кальция в сочетании с оксидом магния и щелочными соединениями. Это приводит к слипанию частиц и окускованию массы — спеканию материала. Температурный интервал этой зоны 1280–1450–1280 °С. В зоне охлаждения выходящий из зоны спекания клинкер охлаждается воздухом, поступающим из охладителя клинкера, до 800–1100 °С в зависимости от его типа.

При обжиге *извести* во вращающихся печах температура для гарантии полной диссоциации карбонатов в крупных кусках поддерживается в пределах 1100–1200 °С.

При обжиге *керамзита* во вращающихся печах материал подогревается от 100 до 875 °С при температуре в печи 850–1100 °С. В зоне вспучивания почти скачкообразно снижается плотность гранул с повышением температуры материала до 1125 °С. В зоне отвердевания температура снижается от 1125 до 1025 °С и, соответственно, снижается температура газов.

Из-за нагрева длина и диаметр цилиндрических корпусов вращающихся печей увеличиваются. При удлинении корпуса меняется положение

его бандажей относительно опорных роликов. Чтобы бандаж занимал среднее положение на опорных роликах, при монтаже печи они должны быть сдвинуты к концам печи на величину

$$\Delta l = \varphi \Delta T L,$$

где Δl — среднее положение на опорных роликах, м; φ — коэффициент линейного расширения корпуса (для стали $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ 1/град); ΔT — средняя разность температур, °С; L — расстояние от нейтрального сечения до той опоры роликов, для которой определяется сдвиг, м.

Деформация корпуса может быть также и поперечной, например, при остановке печи с раскаленным сыпучим материалом; нижняя часть корпуса прогревается сильнее и удлиняется больше, чем верхняя. Вследствие этого стрела прогиба между опорами может достигать 100–150 мм. В результате остановки печи корпус может даже прогореть. Прогибы корпуса вследствие остановки печи исчезают не всегда и не полностью, так как в результате охлаждения корпуса потоком холодного воздуха, поступающего снаружи, будут появляться остаточные деформации.

Современные цилиндрические вращающиеся печи оснащены специальными установками для постоянного автоматического бесконтактного контроля температуры печи, что обеспечивает нормальный температурный режим корпуса вращающейся печи и увеличение срока службы футеровки. Температура внешней поверхности печи, доступной для прикосновения с рабочих мест обслуживающего персонала, не должна превышать 400 °С при установке печи внутри производственных помещений и 600 °С при установке печи на открытой площадке [4].

Для охлаждения корпуса печи применяют водяное или воздушное (вентиляторами) охлаждение. При водяном охлаждении вдоль корпуса по длине зоны спекания установлены два (с двух сторон печи) перфорированных трубопровода с отверстиями для полива воды на корпус. При этом способе охлаждения можно устранить перегревы корпуса, а следовательно, продлить срок службы футеровки. Для устранения образования накипи на корпусе печи применяют химически очищенную воду.

Для воздушного охлаждения корпусов печей устанавливают передвижные (на тележках под печью) вентиляторы. По длине зоны спекания используют несколько передвижных вентиляторов, которые включают по мере надобности в местах перегрева корпуса. Воздушное охлаждение корпуса печи представляет собой стационарно установленный вдоль печи воздушный коллектор 3 (рис. 1) с соплами 2, снабженными откидными клапанами, перекрывающими выход из них воздуха.

Вышеописанное устройство для охлаждения корпуса печи на участке зоны спекания заблокировано с установкой для контроля тем-

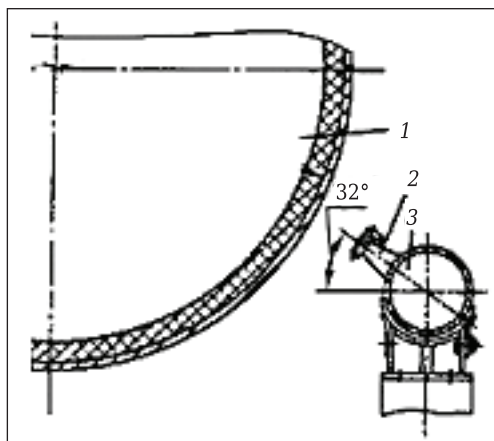


Рис. 1. Вариант охлаждения корпуса печи: 1 — вращающаяся печь; 2 — патрубок с соплом; 3 — воздушный коллектор

пературы корпуса печи. При превышении допустимой температуры корпуса печи на каком-то участке включают вентиляторы и открывают сопла устройства для охлаждения на этом же участке. Охлаждающий воздух в коллектор нагнетается вентиляторами. Каждый вентилятор обеспечивает воздухом работу сопел, которые включаются в работу на том участке зоны спекания, на котором наблюдается перегрев. Сопла, подающие воздух на бандаж, постоянно открыты. Практический опыт цементной промышленности (<http://shlakoblok.com/block/oxlazhdenie-korpusa-vrashhayushhejsya-pechi/>) показал, что охлаждение корпуса вращающейся печи на участке зоны спекания увеличивает срок службы футеровки в 1,5–2 раза. В большинстве печей с водяным охлаждением корпуса для футеровки зоны спекания вместо дорогостоящих огнеупоров можно использовать огнеупорный шамот. Водяное охлаждение не вызывает дополнительных потерь тепла через корпус печи на участке зоны спекания. Наоборот, изменение количества охлаждающей воды дает возможность регулировать толщину обмазки на футеровке печи. Применяемый на практике способ охлаждения корпуса печи в зоне спекания показан на рис. 2.

Охлаждающее устройство состоит из орошающих трубопроводов. В дополнение к ним предусмотрены разбрызгивающие трубопроводы. После ввода печи в нормальный режим эксплуатации охлаждение корпуса проводят путем ступенчатого включения распылителей для устранения резкого охлаждения. Затем включают орошение, а разбрызгивание при необходимости отключают. Для охлаждения корпуса печи применяют также охватывающий печь экран из труб, через который прокачивается вода; вода при этом нагревается и используется для бытовых целей.

Авторами настоящей статьи предлагается разработка, которая относится к высокотемпературной теплозащите трубопроводов горячих сыпучих материалов и цилиндрических аппаратов и может быть использована в огнеупорной отрасли, в машиностроении, железнодорожном транспорте, а также в промышленности строительных материалов для изготовления оборудования преимущественно цилиндрического сечения, баков, котлов, воздухопроводов любой конфигурации.

Задачи разработки:

- использование теплозащиты на работающем высокотемпературном трубопроводе разного диаметра вплоть до вращающихся цилиндрических обжиговых печей металлургии и стройиндустрии;

- увеличение эффективности теплозащиты;
- утилизация нагретого сжатого агента для нужд предприятия.

На рис. 3 схематично показано устройство теплозащиты стенок высокотемпературных

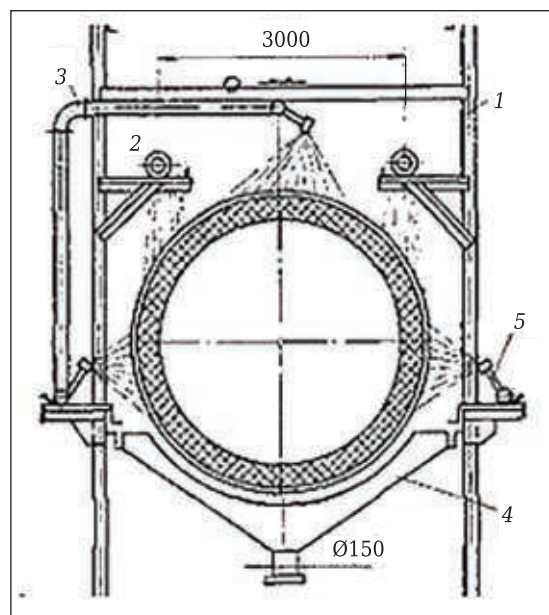


Рис. 2. Водяное охлаждение корпуса вращающейся печи в зоне спекания: 1 — несущая рама; 2 — трубопроводы для разбрызгивания; 3 — трубопроводы для орошения; 4 — водосборник; 5 — разбрызгивающие сопла

трубопроводов и цилиндрических аппаратов. Устройство теплозащиты стенки высокотемпературного цилиндрического аппарата содержит поверхность (стенку) 1, нуждающуюся в теплоизоляции [5–7]. Теплозащита высокотемпературного цилиндрического аппарата выполнена в виде свернутой по винтовой линии трубы 2, которая заполнена охлаждающим агентом, например воздухом или жидкостью. Поверх свернутой по винтовой линии трубы 2 смонтировано цилиндрическое покрытие (кожух) 3. Для создания винтового движения охлаждающего агента вокруг высокотемпературного цилиндрического аппарата выполнен винтообразный зазор 4 между его стенкой 1 и кожухом 3, кото-

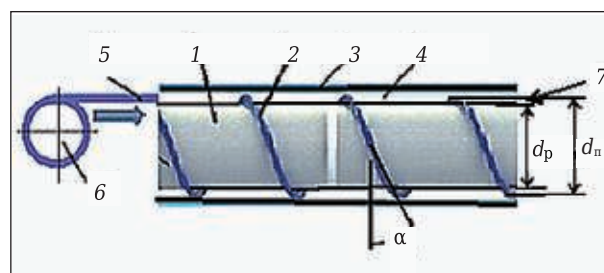


Рис. 3. Устройство теплозащиты стенки высокотемпературного цилиндрического аппарата: 1 — стенка; 2 — винтовая труба; 3 — кожух; 4 — зазор винтообразный; 5 — патрубок; 6 — источник сжатого агента; 7 — зазор между наружной поверхностью винтовой трубы 2 и кожухом 3; α — угол подъема винтовой трубы 2; d_n — диаметр винтовой трубы; d_p — диаметр цилиндрического аппарата

рый соединен патрубком 5 с источником 6 сжатого охлаждающего агента. Труба 2 намотана по винту на стенку 1 цилиндрического аппарата с определенным шагом. Винтовое пространство (зазор) 4 между поверхностью 1 цилиндрического аппарата и кожухом 3 заполнено подвижным охлаждающим агентом. Пневмо- или гидронасос 6, предназначенный для подачи охлаждающего агента в винтообразный зазор 4, создает винтовое движение этого агента вокруг стенки горячего цилиндрического аппарата.

Намотанная с достаточным шагом винтовая труба 2 позволяет наружным диаметром создавать необходимый зазор между наружной поверхностью цилиндрического аппарата и кожухом 3. Кожух 3, опираясь на наружную поверхность винтовой трубы 2, создает необходимый винтообразный зазор 4, в который подается подвижной охлаждающий агент. Охлаждающий агент движется под напором от пневмо- или гидронасоса по винтообразному зазору 4. В результате создается движение охлаждающего агента по винту в винтовом зазоре 4 вокруг стенки 1 цилиндрического аппарата и между витками винтовой трубы 2. В случае теплозащиты вращающегося цилиндра вокруг оси необходимо создать зазор 7 между наружной поверхностью винтовой трубы 2 и кожухом 3.

Особенность предложенной конструкции охлаждения стенки цилиндрического аппарата 1 заключается в том, что охлаждающий агент движется по винтовой линии в осесимметричном зазоре, образованном поверхностями цилиндрического аппарата 1, кожуха 3 и винтовой трубы 2. Процесс охлаждения стенки высокотемпературного цилиндрического аппарата с использованием охлаждающего агента предложенного устройства теплозащиты относится к математической модели внешней задачи теплообмена.

Движение охлаждающего агента по винтовой линии в соответствии с уравнениями Бернулли и Клапейрона снижает температуру стенки цилиндрического аппарата в зависимости от величины циркуляции, т. е. угла наклона винта трубы [8, 9]. Для рассмотрения внешней задачи теплообмена при турбулентном движении охлаждающего агента критериальное уравнение подобия конвективной теплоотдачи (процесс переноса теплоты между поверхностью твердого тела и жидкой средой или газом, при котором перенос теплоты осуществляется путем теплопроводности и конвекции) имеет вид [8] (<http://thermalinfo.ru/eto-interesno/kriterialnye-uravneniya-teploobmena-raschet-teplotdachi-v-trubah-i-kanalah>):

$$Nu_{cp} = 0,021 \gamma Re_{cp}^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_p}{Pr_0} \right)^{0,25}, \quad (1)$$

где Nu_{cp} — критерий Нуссельта (теплообмена) представляет собой критерий, характеризую-

щий интенсивность теплообмена на границе стенки цилиндрического аппарата и охлаждающего агента, $Nu_{cp} = \frac{\beta d_p}{\lambda}$; β — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); d_p — диаметр цилиндрического аппарата (см. рис. 3), м; λ — теплопроводность охлаждающего агента, Вт/(м·К); γ — коэффициент, учитывающий влияние центробежных сил при движении охлаждающего агента по винтовой линии; Re_{cp} — критерий Рейнольдса, определяющий соотношение сил инерции и вязкости в потоке охлаждающего агента [10],

$$Re_{cp} = \frac{\sqrt{W_p^2 + 0,25 \omega^2 d_{co}^2}}{\nu}; W_p — \text{скорость движения}$$

охлаждающего агента, м/с; d_{co} — средний диаметр вращательного движения охлаждающего агента, м; ω — угловая скорость охлаждающего агента, с⁻¹; ν — кинематическая вязкость охлаждающего агента, м²/с; Pr_p — критерий Прандтля, определяющий физические свойства охлаждающего агента, $Pr_p = \nu/a$; a — температуропроводность, м²/с, $a = \lambda/c\rho$; c — теплоемкость охлаждающего агента, Дж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³.

С учетом физики процесса охлаждения среднюю температуру Δt_{cp} охлаждающего агента, К, представим в виде

$$\Delta t_{cp} = \gamma(t_{ct} - \Delta t),$$

где γ — коэффициент, учитывающий влияние центробежных сил при движении охлаждающего агента по винтовой линии, $\gamma = 1 + 1,77 \frac{d_p}{d_{co}}$; t_{ct} — температура стенки цилиндрического аппарата, К; Δt — средний логарифмический температурный напор между стенкой и охлаждающим агентом, К.

Повышение эффективности теплоотдачи за счет термовихревого движения охлаждающего агента вокруг наружной стенки цилиндрического аппарата обусловлено снижением статического давления и, как результат, его ростом удельного теплового потока за счет роста температурного напора.

Изменение температуры охлаждающего агента определяем с учетом уравнений Бернулли и Клапейрона и теорем Стокса и Гельмгольца [8–11].

Циркуляцию охлаждающего агента Π , м²/с, представим в виде

$$\Pi = \frac{\pi}{tg\alpha} d_{co} W_{co}, \quad (2)$$

где α — угол подъема винтовой линии трубы, рад; W_{co} — средняя скорость движения охлаждающего агента, м/с.

Уравнение падения статического давления охлаждающего агента ΔP , кг/(м²·с²), в соответствии с теоремой Гельмгольца и формулами (1) и (2) получим в виде

$$\Delta P = \frac{m W_{co}}{tg^2 \alpha}, \quad (3)$$

где m — массовый удельный расход охлаждающего агента, кг/(м³·с).

Снижение температуры охлаждающего агента Δt_{ow} , К, в соответствии с уравнением Клапейрона получим в виде

$$\Delta t_{ow} = \frac{W_{co}^2}{2R tg^2 \alpha}, \quad (4)$$

где R — газовая постоянная, м²/(с²·К).

Таким образом, термоаэродинамический эффект теплоотдачи от вращения охлаждающего агента по винтовой линии увеличивается с ростом его окружной скорости, т. е. с уменьшением угла α .

Для подтверждения достоверности роста температурного напора за счет термовихревого эффекта при движении охлаждающего агента были проведены эксперименты, результаты которых показаны на рис. 4. Верификация подтвердила достаточную сходимость теории и эксперимента. Уменьшение α от 80 до 15° позволяет снизить температуру стенки цилиндрического аппарата за счет термовихревого эффекта «торнадо» на 14 %.

Таким образом, разработана активная теплозащита трубопроводов горячих сыпучих материалов и цилиндрических аппаратов, содержащая свернутую по винтовой линии трубу,

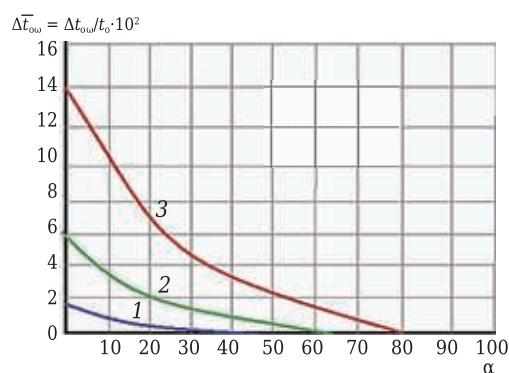


Рис. 4. Зависимость изменения относительной температуры $\Delta \bar{t}_{ow}$ охлаждающего агента за счет термовихревого эффекта от угла α наклона винтовой линии трубы: цифры на кривых — средняя скорость движения охлаждающего агента (указана на кривых, м/с); Δt_{ow} — снижение температуры охлаждающего агента, К; t_0 — температура охлаждающего агента, К

заполненную охлаждающим агентом. Теплозащита позволяет увеличить эффективность теплоизоляции и обеспечить утилизацию нагретого сжатого охлаждающего агента для нужд предприятия. Повышение эффективности теплоотдачи за счет термовихревого движения охлаждающего агента вокруг наружной стенки цилиндрического аппарата обусловлено снижением статического давления охлаждающего агента и ростом удельного теплового потока за счет снижения температурного напора.

Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта, вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство / С. Я. Давыдов, А. Н. Семин. — М. : Изд. фонд «Кадровый резерв», 2016. — 472 с.
3. **Давыдов, С. Я.** Вращающиеся печи предприятий строительных материалов / С. Я. Давыдов, В. А. Пячев, И. Д. Кашеев [и др.]. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 352 с.
4. Общие требования к тепловым агрегатам (https://studbooks.net/2505965/tovarovedenie/obschie_trebovaniya_teplovym_agregatam).
5. **Пат. 204896 Российская Федерация.** Устройство теплоизоляции высокотемпературных трубопроводов / Давыдов С. Я., Угольников А. В., Макаров В. Н., Макаров Н. В. ; заявитель Угольников А. В. — № 2021102406 ; заявл. 02.02.2021 ; опубл. 17.06.2021, Бюл. № 17.
6. **Пат. 206963 Российская Федерация.** Устройство для теплоизоляционного покрытия трубопроводов / Кожушко Г. Г., Давыдов С. Я., Евсеев Н. А. ; заявитель ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет». — № 2021108138 ; заявл. 26.03.2021 ; опубл. 04.10.2021, Бюл. № 28.

7. **Давыдов С. Я.** Активный контроль состояния защиты теплоизоляции трубопроводов / С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, Н. Г. Валиев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2021. — № 9. — С. 9–12.
8. **Лойцанский, Л. Г.** Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцанский. — М. : Наука, 2003. — 736 с.
9. **Косарев, Н. П.** Критерии подобия гидровихревой локализации взрывов на горных предприятиях / Н. П. Косарев, Н. В. Макаров, В. Н. Макаров [и др.] // Изв. УГТУ. — 2019. — Вып. 3/55. — С. 124–132.
10. **Nosyrev, M. B.** Mathematical model of hydrovortex coagulation / M. B. Nosyrev, N. V. Makarov, V. N. Makarov, A. V. Ugolnikov // Mathematical Analysis With Applications — In Honor of the 90th Birthday of Constantin Corduneanu. — P. 366–374.
11. **Макаров, В. Н.** Математическое моделирование вихревого гидрообеспыливателя на горнообогатительных предприятиях / В. Н. Макаров, Н. В. Макаров, Н. С. Плотников, В. В. Потапов // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ. — 2018. — № 4. — С. 197–203. ■

Получено 24.01.21
© С. Я. Давыдов, В. Н. Макаров,
Г. Г. Кожушко, Н. В. Макаров,
А. В. Угольников, 2021 г.