



Influence of technology factors on efficiency of processes of dehydration and deoiling of metal chips is investigated. The new universal simple method of definition of coefficients of filtration and free infiltration of liquid in porous medium is offered.

О. М. ДЬЯКОНОВ, БНТУ

УДК 669.054.8

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ И ОБЕЗМАСЛИВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ

Переработка стружки и металлосодержащих шламов традиционно включает в себя технологические операции дробления, сортировки, просеивания, удаления различного рода примесей, влаги, масла и СОЖ. Дальнейшая переработка в зависимости от вида металлоотходов, их химического состава и физико-механических свойств осуществляется методами порошковой металлургии или металлургического переплава. Отходы перерабатываются в порошок, брикетируются или переплавляются россыпью в зависимости от вида плавильного агрегата и его емкости. В настоящей работе при осуществлении указанных операций применяются методы термомеханической и химико-термической обработки металлоотходов, позволяющие в значительной степени повысить качество исходного сырья и получить изделия с высокими эксплуатационными свойствами.

Цель настоящей работы – определение влияния технологических факторов на эффективность процессов обезвоживания и обезмасливания металлической стружки.

Центрифугирование стружки с подогревом.

Основной задачей, решаемой применением процесса центрифугирования стружки, является удаление СОЖ, по окончании которого остаточное содержание масла в стружке не должно превышать 1,0–1,5%. Именно при таком показателе дальнейшее осуществление горячего брикетирования стружки происходит без превышения ПДК вредных веществ в составе выбросов в атмосферу. Главными характеристиками процесса центробежного фильтрования являются фактор разделения, температура, длительность, ширина щелей ротора, производительность. Фактор разделения характеризует напряженность центробежного поля и представляет собой отношение центробежного ускорения $\left(a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r\right)$ к ускорению свободного падения (g):

$$Fr = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{4\pi^2 n^2 r}{g} \quad (1)$$

Процесс центробежного фильтрования стружки условно можно разделить на три основных периода: формирование осадка, объемное уплотнение осадка с отжатием от СОЖ, истечение СОЖ (фугата) через проницаемую перегородку (экран) ротора. В первое мгновение материал стружки, попадая на ротор, разделяется на две фазы: твердую и жидкую. Первая фаза стремится к экрану быстрее второй. Вторая фаза несколько отстает от первой, образуя жидкостный стакан. Фильтрование протекает под действием гидравлического напора в соответствии с уравнением для ламинарной фильтрации (уравнение Грейса) [1]:

$$Q_1 = \frac{p_f \omega^2 (R^2 - r_0^2) \pi K_{\text{пни}} L_1}{\mu_1 \ln \frac{R}{r_c}} \quad (2)$$

где Q_1 – производительность по фугату на участке ротора длиной L_1 ; $K_{\text{пни}}$ – коэффициент проницаемости среды в первом периоде центробежного фильтрования (с учетом перегородки); μ_1 – динамический коэффициент вязкости жидкой фазы; p_f – падение давления при прохождении жидкости через фильтрующую среду; ω – угловая скорость вращения ротора; R , r_c – соответственно наружный и внутренний радиусы кольцевого слоя осадка; r_0 – внутренний радиус слоя жидкости; L_1 – длина фильтрующей части ротора, соответствующая первому периоду фильтрования.

Связь между средней производительностью центрифуги по питанию $Q_{1\text{ср}}$ и полным временем цикла формирования осадка $t_{1\text{ц}}$ выражается уравнением [2]:

$$Q_{1cp} = \frac{2\pi R\omega h_1}{t_{1и}} \sqrt{\frac{L_1 K_{пн1} \rho_{\phi} \rho_{ж} t}{\mu_1 S_k K_1 \left(1 - \frac{S_k}{\rho_T}\right)}}, \quad (3)$$

где h_1 – средняя толщина слоя осадка во время первого периода; ρ_{ϕ} – плотность фильтрата; $\rho_{ж}$ – плотность влажного осадка, уплотненного при центрифугировании; K_1 – отношение массы влажного осадка к массе сухого осадка; S_k – концентрация твердой фазы в смеси; ρ_T – плотность твердой фазы сухого осадка; t – текущее значение времени.

В первом периоде из стружки удаляется основное количество жидкости (90–95%), которое составляет свободная жидкость. Второй период центробежного фильтрования характеризуется непрерывным падением скорости отделения жидкой фазы, которую в основном составляют капиллярная и адгезионная жидкости. Капиллярная жидкость удерживается в стружке капиллярными силами, заполняя промежутки между частицами, а также внутренние поры. Адгезионная жидкость, удерживаемая силами поверхностного натяжения в виде перемычек в местах контакта частиц, по своим свойствам близка к капиллярной.

С уменьшением смачиваемости частиц металла и увеличением радиуса капилляров падает капиллярное давление и появляется возможность более эффективного отвода СОЖ. Известная формула Пуазейля [3] характеризует зависимость объема жидкости q_k , протекающей через капилляр в единицу времени, от радиуса капилляра r_k , динамической вязкости жидкой фазы $\mu_{ж}$ и градиента давления $\frac{dp}{dl}$:

$$q_k = \frac{\pi r_k^4}{8\mu_{ж}} \frac{dp}{dl}. \quad (4)$$

При неограниченном увеличении градиента $\frac{dp}{dl}$ теоретически можно добиться почти полного удаления влаги из стружки за исключением влаги, связанной химически, и гигроскопической.

Капли масляной фазы эмульсионных СОЖ, связанные с частицами металла химически, содержатся в них в весьма небольших количествах. Некоторое количество водной фазы СОЖ прочно адсорбируется частицами металла. И в первом, и во втором случаях они могут быть удалены из стружки только нагревом.

При увеличении фактора разделения во втором периоде скорость отвода фугата также сначала растет, а затем постепенно убывает. Уравнение для

определения производительности центрифуги по фугату во втором периоде имеет следующий вид [2]:

$$Q_{2cp} = \frac{8\pi r_{2cp}^2 L_2 K_{пн2}^2 p_f^2 \omega^2}{\mu_1} \exp\left[-\frac{2r_{2cp} K_{пн2} p_f \omega^2 t}{\mu_1 h_2}\right], \quad (5)$$

где $r_{2cp} = (R + r_c)/2$ – средний радиус слоя; L_2 – длина участка ротора, соответствующая второму периоду фильтрования; $K_{пн2}$ – коэффициент проницаемости среды во втором периоде (с учетом перегородки); h_2 – толщина слоя осадка в начале второго периода.

Третий период центробежного фильтрования характеризуется значительным увеличением сопротивления среды вследствие действия молекулярных сил. Возникающее при этом капиллярное давление и вязкость жидкости препятствуют отделению фугата через фильтрующую перегородку. Авторы [2, 3] утверждают, что с некоторыми допущениями можно использовать уравнение (5) для описания третьего периода, приняв $L_2 = L_3$, при условии соответствия ему $K_{пн} = K_{пн3}$ и $h = h_3$.

Исследование влияния технологических факторов на эффективность процесса центрифугирования металлической стружки проводили на лабораторной фильтрующей центрифуге (рис. 1) с диаметром ротора 800 мм и регулируемой частотой вращения в диапазоне 600–1200 об/мин. Боковая вертикальная стенка ротора l имеет перфорацию в виде вертикальных щелей длиной 300 мм и шириной 1,4 мм, чередующихся с шагом 2,8 мм. Требуемую частоту вращения устанавливали путем смены шкивов и подбора передаточного отношения клиноременной передачи привода 2. В качестве испытываемого материала брали чугунную стружку СЧ25 с размером фракций 5–10 мм. Исходное содержание СОЖ (машинного масла) в стружке составляло 12–15% при массе одной

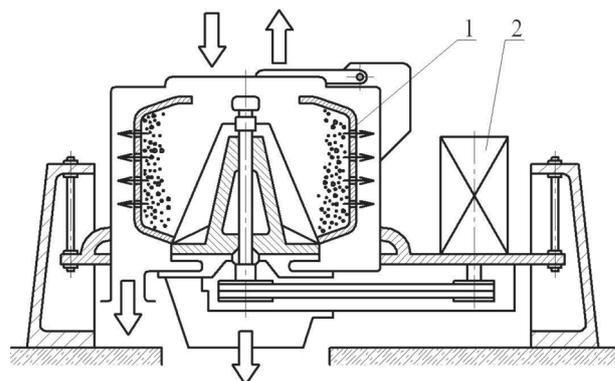


Рис. 1. Лабораторная фильтрующая центрифуга с цилиндрическим ротором и регулируемой частотой вращения

засыпки 40 кг. Испытания проводили в температурном диапазоне 20–100 °С. Стружку нагревали в сушильном электрошкафу ШСТ. Текущие значения содержания СОЖ в стружке в процессе центробежного фильтрования определяли по исходному значению и массе взвешиваемого фугата. Результаты проведенного исследования приведены в табл. 1, 2.

Т а б л и ц а 1. Зависимость остаточного содержания СОЖ (масла) от фактора разделения и времени центрифугирования

Время центрифугирования, мин	Фактор разделения/частота вращения ротора, об/мин			
	161/600	286/800	447/1000	644/1200
	остаточное содержание масла, %			
1,0	10,5	7,2	5,3	4,2
2,0	9,0	5,9	4,1	3,5
3,0	7,9	4,7	3,3	2,7
4,0	6,0	3,0	2,3	2,1
5,0	4,2	2,0	1,6	1,4

Т а б л и ц а 2. Зависимость остаточного содержания СОЖ (масла) от температуры

Температура нагрева стружки, °С	Фактор разделения/частота вращения ротора, об/мин			
	161/600	286/800	447/1000	644/1200
	остаточное содержание масла, %			
20	4,2	2,0	1,6	1,4
40	2,8	1,5	1,1	0,8
60	2,2	1,2	0,9	0,6
80	2,1	1,1	0,8	0,5
100	2,0	1,0	0,7	0,4

Как видно из таблиц, с повышением фактора разделения и температуры нагрева стружки увеличивается производительность центробежного фильтрования и снижается остаточное содержание СОЖ в стружке. При этом оптимальными следует считать фактор разделения $Fr = 300–350$ (820–880 об/мин) и температуру 40–60 °С, при которых достигается удовлетворительное остаточное содержание масла 1,0–1,5%.

Влияние температуры нагрева стружки на эффективность процесса центрифугирования в основном происходит через снижение вязкости масла. Как видно из рис. 2 [4], вязкость масла весьма чувствительна к нагреву, поэтому снижение вязкости – наиболее эффективный метод регулирования остаточного содержания масла, которое в дальнейшем используется при получении брикетов. Влияние температуры на вязкость жидкостей можно оценить следующей формулой:

$$\mu = \mu_0 e^{-\lambda(T-T_0)}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент, значение которого для масел меняется в пределах 0,02–0,03.

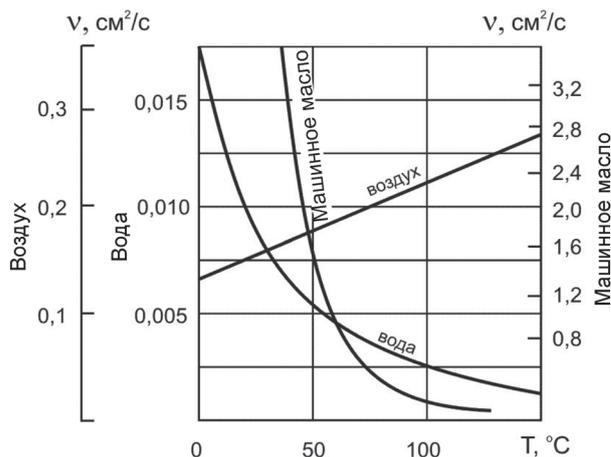


Рис. 2. Зависимость кинематического коэффициента вязкости воздуха, воды и масла от температуры

Исследование процесса центрифугирования стружки на водоземлемой СОЖ при тех же условиях показало, что остаточное содержание СОЖ в стружке не превышает 1%. Вместе с тем, следует отметить, что при осуществлении процесса центробежного фильтрования на непрерывно действующих центрифугах необходимо учитывать кратковременность процесса фильтрации и правильно подбирать соотношение количества удаляемого фугата и времени центрифугирования.

Термовибрационная очистка. Для разделения жидкой и твердой фаз мелкофракционной чугуновой стружки и шламов на масляной СОЖ (<5 мм) необходимо создать условия, при которых увеличилось бы количество свободной жидкости и ослабились бы связи молекулярного взаимодействия (поверхностное натяжение, капиллярные эффекты, силы трения и т. д.). Такие условия создаются в результате применения разработанного нами термовибрационного метода (рис. 3).

Стружка загружается в стальной муфель 1 вертикальной газопламенной печи 2, выпускная горловина которого снизу запирается вибрлотком 3. К днищу вибрлотка 3 прикреплен электромеханический вибратор 4. С помощью двух гидроцилиндров и пружинных траверс лоток 3 приподнимает муфель 1 вместе со стружкой на небольшое расстояние (20–50 мм), принимая на себя функцию вибропоры. Для удаления СОЖ стружка нагревается в печи 2 при включенном вибраторе 4. Вибрация передается стружке непосредственно от опоры 3 и опосредованно от муфеля 1 по всей высоте столба стружки. Стружка уплотняется, ее теплопроводность увеличивается. Для свободного истечения СОЖ из муфеля вибрлотку 3 придается наклонное положение с углом самоторможения для стружки. Жидкость стекает по вибрлотку 3 в емкость 5, а стружка остается в муфеле 1.

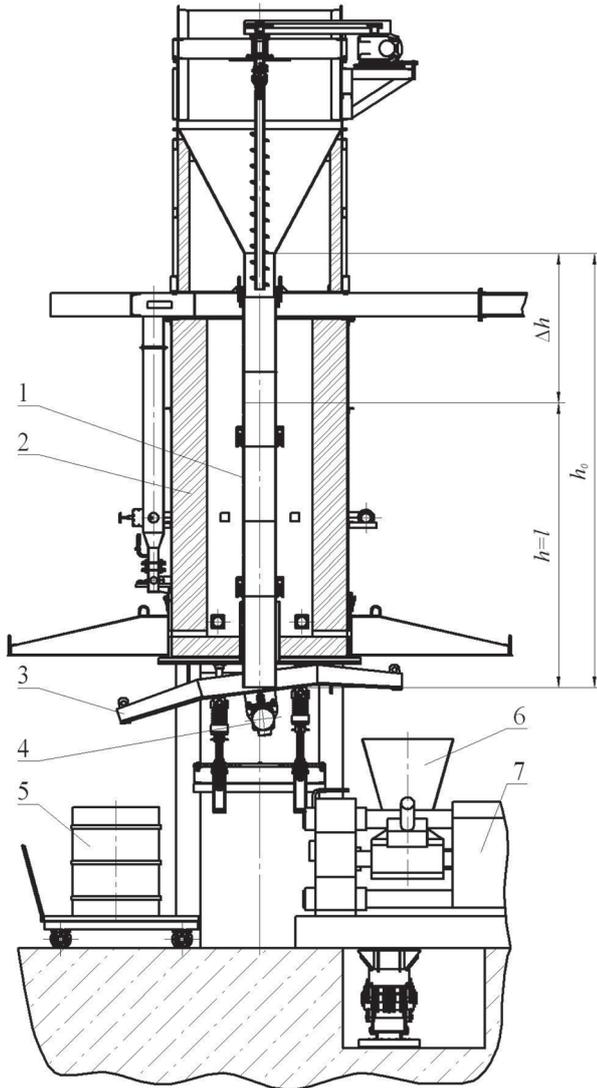


Рис. 3. Установка горячего брикетирования (УГБС) в режиме термовибрационной очистки стружки от СОЖ

При нагреве все виды связей жидкости с металлом ослабевают. Под действием вибрации капли жидкости отрываются от частиц металла и стекают вниз под действием силы тяжести. При этом гидрофобное масло образует с металлической подложкой менее прочные связи и отрывается легче, чем гидрофильная вода. Вибрация переводит стружку во взвешенное состояние, облегчая и ускоряя процесс истечения жидкости. При дальнейшем нагреве, уже после удаления основной массы СОЖ, с поверхности металла удаляются остатки масла, связанные с ним силами молекулярного взаимодействия. Переход к более высоким температурам происходит непрерывно и при заданной температуре нагрева стружка подается по лотку 3 в приемный бункер 6 брикетировочного пресса 7.

Истечение жидкости из пористого тела сплошным потоком при полном заполнении пор представляет собой фильтрацию жидкости в гравитационном поле с наложением вибрации (вибро-

фильтрация). При частичном заполнении пор сплошность потока нарушается, процесс истечения жидкости, согласно определению Г. Н. Каменского [5], представляет собой свободное просачивание через поры каплями или отдельными струями (капельно-струйчатое турбулентное движение). Однако и в этом случае при условии равномерного распределения пор по объему тела истечение жидкости происходит под преобладающим действием сил молекулярного взаимодействия. Силы тяжести, определяющие величину и направление градиента напора, не могут привести к сколько-нибудь значительному изменению скорости потока жидкости.

Рассмотрим процесс истечения жидкости из стружки при единоразовой загрузке в муфель. Изначально и в последующем стружка заполняет муфель 1 (рис. 3) доверху так, что высота столба стружки равна высоте муфеля h_0 , при этом допускаем, что плотность стружки и жидкость, содержащаяся в ее порах, распределены по всему объему равномерно. Первоначальный гидродинамический напор равен длине пути сопротивления или высоте столба стружки ($h_0 = l_0$). По мере истечения жидкости из муфеля ее уровень h , а вместе с ним и длина пути l падают, при этом $l = h$. Падение напора $\Delta h = h_0 - h$.

Если известно количество жидкости в стружке $m_{ж}$, то ее объем равен:

$$V_{ж} = \frac{m_{ж}}{\rho_{ж}} = k V_{п} = k \varepsilon V, \quad (7)$$

где k – коэффициент заполнения пор жидкостью ($k \leq 1$).

Коэффициент k определяется из начальных условий ($h = h_0$, $m_{ж} = m_{ж0}$):

$$k = \frac{V_{ж0}}{V_{п0}} = \frac{m_{ж0}}{\rho_{ж} \varepsilon V_0} = \frac{m_{ж0}}{\rho_{ж} \varepsilon S h_0}, \quad (8)$$

где S – номинальная площадь поперечного сечения муфеля.

В виду того что поперечное сечение потоков жидкости ограничено размерами пор и силами поверхностного натяжения, а падение напора компенсируется падением длины пути сопротивления, можно допустить, что коэффициент k остается постоянной величиной.

Для определения производительности Q и продолжительности процесса удаления СОЖ из стружки t_k рассмотрим структуру поперечного сечения столба стружки площадью S . Это сечение состоит из «металлического» сечения частиц металла S_M и «порового» сечения $S_{п}$:

$$S = S_m + S_n. \quad (9)$$

При известном значении относительной плотности стружки в муфеле ϑ

$$S_m = \frac{V_m}{h_0} = \frac{\vartheta V}{h_0} = \vartheta S, \quad (10)$$

$$S_n = (1 - \vartheta)S = \varepsilon S. \quad (11)$$

Поровое сечение, так же как и объем стружки, полностью или частично заполнено жидкостью в зависимости от исходного содержания СОЖ:

$$k = \frac{V_{ж0}}{V_{п0}} = \frac{S_{ж} h_0}{S_n h_0} = \frac{S_{ж}}{S_n} = \frac{S_{ж}}{\varepsilon S}. \quad (12)$$

С учетом (8) суммарная площадь поперечного сечения потоков жидкости или «жидкостного» сечения будет равна:

$$S_{ж} = k \varepsilon S = \frac{m_{ж0}}{\rho_{ж} h_0} \leq \varepsilon S. \quad (13)$$

В случае фильтрации скорость движения жидкости в сечении на высоте h определяется законом Дарси для сплошных ламинарных и турбулентных потоков:

$$v = KI = K \frac{h_0 - \Delta h}{l} = K, \quad (14)$$

где K – коэффициент фильтрации; l – напорный градиент.

В выражении (14) при единичном напорном градиенте скорость фильтрации равна коэффициенту фильтрации. Коэффициент фильтрации определяется опытным путем и представляет собой функцию относительной пористости стружки и вязкости жидкости. Вязкость в свою очередь зависит от температуры.

В случае свободного просачивания движение жидкости по поверхности частиц стружки чередуется со свободным падением капель, струй жидкости, которое в пористом теле ограничено во времени. Движение потока затормаживается, его средняя скорость при единичном напорном градиенте равна коэффициенту просачивания. Таким образом, формулу закона Дарси для сплошных потоков (14) можно принять и в случае неполного заполнения пор, наличия воздуха в порах и т. д. Коэффициент просачивания не равен коэффициенту фильтрации и его надо определять экспериментально.

По известным значениям скорости и суммарной площади поперечного сечения жидкостных потоков (13) расход СОЖ определяется по формуле:

$$Q = v S_{ж} = v \frac{m_{ж0}}{\rho_{ж} h_0}. \quad (15)$$

Продолжительность процесса при равномерном истечении жидкости:

$$t_k = \frac{h_0}{v}. \quad (16)$$

Для проверки предположения о постоянстве скорости термовибрационной очистки нами была исследована зависимость $Q(t)$ при различных температурах. Кроме того, изучалась зависимость времени удаления СОЖ t_k от температуры. Материалом для испытаний была выбрана мелкофракционная чугунная стружка (<5 мм) с исходным содержанием масляной СОЖ (машинного масла) 20%. Параметры УГБС: высота муфеля $h_0 = 4$ м, номинальная площадь поперечного сечения муфеля $S = 0,16$ м², масса засыпки чугунной стружки в муфель после уплотнения вибрацией $m = 1120$ кг, $k = 0,58$ (см. формулу (8)) – случай свободного просачивания жидкости через поры стружки.

СОЖ по вибрлотку 3 сливали в емкость 5 (рис. 3), установленную на весах. Время истечения фиксировали с помощью секундомера по мере удаления равных весовых объемов жидкости (через каждые 20 кг). Окончание процесса определялось визуально. Затем опыты повторяли уже при другой температуре.

Для проведения данного эксперимента в шахте печи 2 были установлены нагревательные элементы – электроспираль сопротивления. Температуру в шахте измеряли и регулировали с помощью трех термопар, установленных на разных высотных уровнях. Температуру стружки определяли с помощью термопары, установленной в центре вибрлотка. Результаты исследования приведены в табл. 3, зависимости расхода СОЖ и продолжительности процесса очистки от температуры показаны на рис. 4, 5.

Т а б л и ц а 3. Удаление масляной СОЖ из стружки при различных температурах термовибрационным методом

T, °C	t, мин										
	масса СОЖ, кг										
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220
40	3,0	6,0	8,5	11,0	13,8	16,3	19,0	21,8	24,4	27	30
60	2,1	4,2	6,2	8,3	10,3	12,4	14,4	16,5	18,8	21,3	24
80	1,4	2,8	4,1	5,7	7,1	8,4	9,8	11,2	12,7	14,2	16
100	1,2	2,4	3,5	4,8	6,0	7,1	8,1	9,2	10,3	11,5	13
120	1,1	2,2	3,2	4,3	5,2	6,3	7,3	8,4	9,6	10,8	12

Анализ полученных результатов показывает, что процесс удаления СОЖ из стружки под действием вибрации носит волновой характер. Тем не менее, графики изменения расхода СОЖ во времени при различных температурах представляют собой колебания относительно какого-то среднего постоянного значения и только в конце процесса скорость истечения жидкости уменьшается – следствие

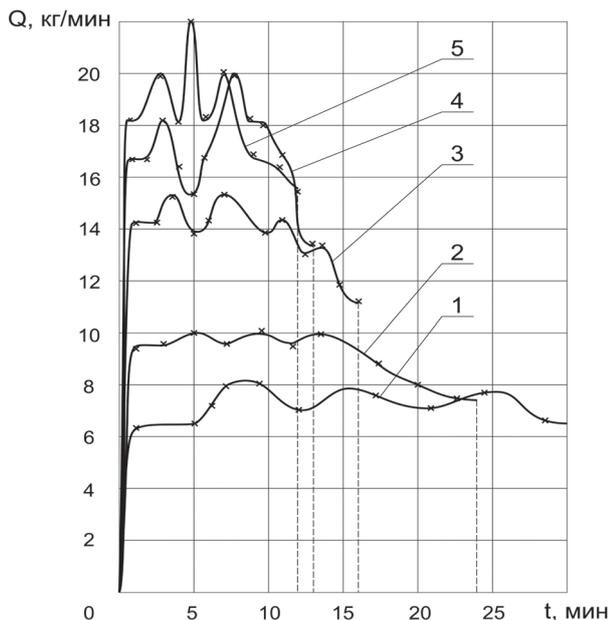


Рис. 4. Изменение расхода СОЖ во времени в зависимости от температуры: 1 – 40 °С; 2 – 60; 3 – 80; 4 – 100; 5 – 120 °С

снижения гидродинамического напора. Таким образом, с достаточной для практических приложений точностью можно принять, что средняя скорость истечения СОЖ из стружки при термовибрационной очистке является величиной постоянной.

Рассмотренный выше метод определения скорости потока жидкости при единичном напорном градиенте может быть использован для определения коэффициентов фильтрации и свободного просачивания жидкостей в пористых средах. Для того чтобы скорость потока была постоянной на протяжении всего процесса, необходимо обеспечить постоянство напора непрерывным добавлением стружки в муфель и поддержанием первоначального уровня жидкости ($h = h_0$). В этом случае указанные коэффициенты определяются непосредственно из опыта без дополнительных вычислений.

Как видно из рис. 5, влияние вибрации на производительность процесса очистки весьма существенно во всем исследованном диапазоне температур (40–120 °С). Производительность очистки возрастает в 3,6–3,7 раз. Оптимальными следует считать температуры 80–100 °С, при которых время осуществления этой подготовительной операции на УГБС не превышает значения, предельно допустимого рабочим циклом, а остаточное содержание масла в стружке составляет 1,0–1,5%.

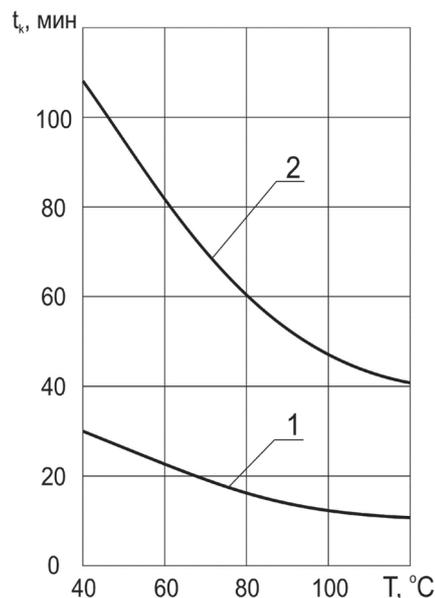


Рис. 5. Зависимость времени фильтрации от температуры: 1 – с вибрацией; 2 – без вибрации

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Процесс центробежного фильтрования крупнофракционной стальной и чугунной стружки (5–50 мм) интенсифицируется повышением фактора разделения до $Fr = 300–350$ и нагревом стружки до 40–60 °С, остаточное содержание масляной СОЖ в стружке составляет 1,0–1,5%, водоземulsionной – до 1% при общем исходном содержании жидкой фазы 6–15%.

2. Для обезвоживания и обезмасливания мелкофракционной стружки (<5 мм) предложен термовибрационный метод, совмещающий процесс нагрева стружки до температуры 80–100 °С с вибрацией частотой $n = 47,5$, при этом содержание масла в конечном продукте не превышает 1,0–1,5%.

3. Процессы виброфильтрации и просачивания СОЖ в пористой стружке с равномерным распределением плотности (пористости) по объему носят волновой характер и, тем не менее, в своем усредненном выражении подчиняются закону постоянства скорости потока (закон Дарси) при постоянном напоре и единичном градиенте напора. Предложен новый универсальный простой метод определения коэффициентов фильтрации и свободного просачивания жидкости в пористых средах.

Литература

1. Гга се Н. Р. // Chem. Eng. Progr. 1953. Vol. 40. N 8. P. 427–436.
2. А с н е р В. И. Конструкции и расчеты фильтрующих центрифуг. М.: Недра, 1976.
3. Ж у ж и к о в В. А. Фильтрование. М.: Химия, 1971.
4. Б а ш т а Т. М., Р у д н е в С. С., Н е к р а с о в Б. Б., Б а й б а к о в О. В., К и р и л л о в с к и й Ю. Л. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы. М.: Машиностроение, 1970.
5. К а м е н с к и й Г. Н. Основы динамики подземных вод. М.: ГОСГЕОЛИЗДАТ, 1943.