

**В.И.Большаков, Ю.И.Черевик, А.М.Башмаков**

### **ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ФУРМУ ПРИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА**

Целью работы являлось определение рациональных конструктивных и режимных параметров оборудования, реализующего технологию внепечной десульфурации чугуна. Получены аналитические зависимости, позволившие определить механизм образования вынужденных колебаний, величину и частоту их изменения в зависимости от конструктивных параметров фурмы, режимов дутья и интенсивности процессов парообразования при испарении магнезия. Показано, что знание величины и характера изменения технологической нагрузки, действующей на фурму и её привод, позволяет обеспечить высокую надежность и долговечность оборудования.

**внепечная десульфурация чугуна, оборудование, конструктивные параметры, технологические нагрузки, надежность, долговечность**

**Введение.** В настоящее время на металлургических заводах Украины и за её пределами, особенно в Китае, широкое распространение получил способ десульфурации чугуна гранулированным магнеием, подаваемым в нижние слои расплава через погружаемые фурмы, содержащие испарительные камеры [1-2]. Такие фурмы используются при обработке чугуна в доменных и заливочных ковшах с глубиной погружения до 2,0–2,5 метров. При более глубоком погружении используются прямоточные фурмы без испарительных камер.

**Целью настоящей работы** являлось определение рациональных конструктивных и режимных параметров оборудования, реализующего технологию внедоменной десульфурации чугуна.

**Постановка задачи.** Для определения рациональных конструктивных и режимных параметров оборудования, реализующего такую технологию, и обеспечивающих его высокую надежность и долговечность, необходимо знать величину и характер изменения технологической нагрузки, действующей на фурму и её привод. Для решения этой задачи в работах [3,4] получены аналитические зависимости, позволяющие определять величину и характер изменения этой нагрузки в зависимости от глубины погружения фурмы и интенсивности процесса десульфурации, а также показано, что эта нагрузка является источником вынужденных колебаний, воспринимаемых фурмой, элементами её привода и металлоконструкцией установки. Следующим этапом решения этой задачи является определение частоты и амплитуды этих колебаний и диапазона, в котором они могут изменяться. Эта задача актуальна и представляет практический интерес, потому что её решение обеспечит работу оборудования с минимальными динамическими нагрузками и исключит появление при работе резонансных явлений.

Значения  $D$  и  $D_1$  для разных типоразмеров фурмы, приведены в таблице 1. В табл.1 также приведены конструктивные параметры нескольких типоразмеров фурм с коническим колоколом, рекомендуемых для практи-

ческого использования (рис.1). Наиболее широкое распространение на действующих установках десульфурации чугуна в ковшах различного объема получил типоразмер № 2.

Таблица 1. Конструктивные параметры нескольких типоразмеров фурм с коническим колоколом, рекомендуемых для практического использования

Конструктивный параметр	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	d	d <sub>к</sub>	H <sub>1</sub>	V <sub>о</sub>	V <sub>н</sub>	F <sub>1т</sub> <sup>max</sup>	F <sub>2т</sub> <sup>max</sup>	F <sub>т</sub> <sup>max</sup>
Размерность	м	м	м	м	м	м	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	кН	кН	кН
Типоразмер №1	0,65	0,40	0,18	0,35	0,02	0,60	0,053	0,053	0,95	3,80	4,75
Типоразмер №2	0,70	0,45	0,18	0,35	0,02	0,65	0,069	0,062	1,15	4,45	5,60
Типоразмер №3	0,75	0,50	0,18	0,35	0,02	0,70	0,086	0,069	1,35	5,00	6,35

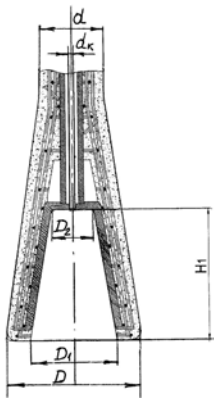


Рис.1. Конструктивные параметры фурмы с испарительной камерой колокольного типа

Во время продувки жидкий чугун вначале вытесняется из испарительной камеры (ИК), а затем в зоне нижнего среза фурмы образуется плоский газовый пузырь, который, после достижения своего максимального объема ( $V_n$ ), распадается на более мелкие составляющие и выбрасывается в расплав по периметру нижнего среза колокола фурмы (рис.1,а) [4].

Величина этого объема определяется зависимостью

$$V_n = \frac{\pi D}{8} (D - D_1) \left[ D + \frac{\pi}{4} (D - D_1) \right]. \quad (1)$$

Длительная эксплуатация фурм с ИК показала, что при десульфурации, в зависимости от степени интенсивности технологического процесса, происходит попадание жидкого чугуна в ИК, во время которого высота  $h_i$  достигает величины 0,08–0,12 м и более (рис.2,б). Значения  $\Delta V_o$  для этих случаев заполнения ИК приведены в табл.2.

Во время продувки общий объем газового пузыря, выбрасываемого из подколокольного пространства, определяется зависимостью, которая включает две составляющие, а именно:

$$V = \Delta V_o + V_n \quad (2)$$

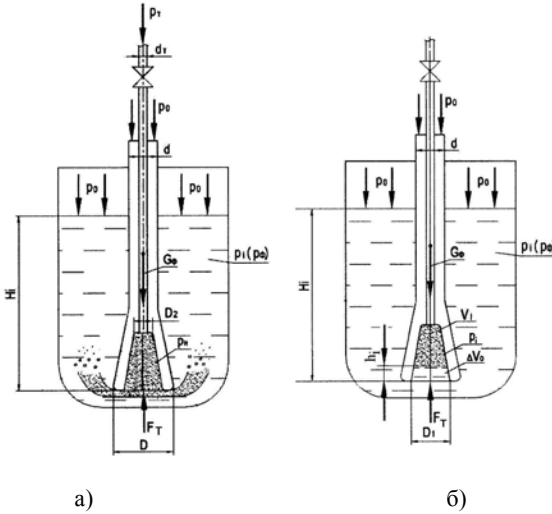


Рис.2. Последовательность образования и действия технологической нагрузки. а – момент распада пузыря на мелкие составляющие и выброса из-под колокольного пространства парогазовой смеси в расплав; б – исходное состояние фурмы в расплав перед образованием нового пузыря

Таблица 2. Технологические и конструктивные параметры ИК

Технологический параметр	$H_i$	$V_r$	$G_M$	$V_M$	$V_{CM}$	$p_T$	$p_M$	$p_\Phi$	$h_i$	$\Delta V_o$	$V$	$\beta$	
Размерность	м	м <sup>3</sup> /с	кг/с	м <sup>3</sup> /с	м <sup>3</sup> /с	МПа	МПа	МПа	м	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	Гц	
Без продувки	min	1,8	–	–	–	–	–	0,13	0,28	0,06	–	–	
	max	2,2	–	–	–	–	–	0,16	0,32	0,011	–	–	
Продувка чистым газом	min	1,8	0,044	–	–	0,26	–	0,13	0,08	0,013	0,075	0,59	
	max	2,2	0,050	–	–	0,30	–	0,16	0,12	0,019	0,081	0,62	
Продувка парогазовой смесью	min	1,8	0,008	0,050	0,046	0,054	0,26	0,22	0,13	0,08	0,013	0,075	0,72
	max	2,2	0,014	0,417	0,383	0,397	0,30	0,26	0,16	0,12	0,019	0,081	4,91

При постоянном количестве газа в ИК фурмы с объемом  $V_o$  и атмосферным давлением при отсутствии дутья, его давление в ИК находится в прямой зависимости от глубины погружения фурмы и при глубине равной 2,2 метра высота  $h_i$  достигает максимальной величины равной 0,32 метра (табл.2). Если продувка начинается в нижнем положении фурмы, то сначала высота  $h_i$

уменьшается до нуля, а затем, когда давление транспортирующегося газа превышает ферростатическое давление расплава в зоне нижнего среза колокола фурмы, газ вытесняется за пределы ИК, образуя плоский пузырь, который затем, разрываясь, попадает в расплав (рис.2, а). Такая ситуация имеет место в реальных производственных условиях, когда в процессе эксплуатации оборудования возникают различные аварийные ситуации, связанные с неполадками в системе пневмотранспорта, электроснабжения или выхода из строя технологического оборудования, когда подача газа в ИК прекращается. Обычно такое явление, как заполнение внутренней полости ИК фурмы расплавом, тем более на максимальную высоту, стремятся вообще не допускать или, по меньшей мере, сводить к минимуму.

В реальных условиях дутье начинается в момент приближения нижнего среза колокола фурмы к поверхности расплава и осуществляется чистым транспортирующим газом с расходом равным 160–180 м<sup>3</sup>/час. Продувка фурмы газом с таким расходом происходит до тех пор, пока она не достигла своего нижнего рабочего положения, то есть не опустилась в расплав на глубину близкую двум метрам. Поскольку скорость погружения фурмы в расплав составляет около 0,2 м/сек, то она достигает своего рабочего положения за 10 секунд. После этого включается механизм фиксации фурмы, который через 5,0–7,0 секунд фиксирует её в этом положении. Таким образом, в течение 15–17 с фурма продувается только чистым газом.

Процесс десульфурации начинается с подачи небольшого количества магния, равного 3,0–5,0 кг/мин, которое затем постепенно увеличивается и может достигать при установившемся процессе максимальных значений порядка 25,0 кг/мин. Обычно процесс десульфурации чугуна происходит при расходе магния равном 8,0–15,0 кг/мин, а расход транспортирующего газа при этом уменьшается до 30,0–50,0 м<sup>3</sup>/час.

Уточнив характерные особенности дутья и режимы подачи реагента на различных этапах подготовки и проведения процесса десульфурации, определив расходные характеристики используемого реагента и транспортирующего газа, а также учитывая, что при испарении одного килограмма гранулированного магния образуется 0,0153 м<sup>3</sup> пара в секунду [5], определим реальные объемы парогазовой смеси, образующейся в результате его испарения при различной интенсивности протекания технологического процесса. Результаты определения этих объемов приведены на рис.3. Анализ кривых 1 и 2, представленных на этом рисунке, показывает, что при движении фурмы вниз на участках № 1 и № 2, когда она продувается чистым газом, его расход вначале (участок № 1) составляет 0,044–0,050 м<sup>3</sup>/с, а затем (участок № 2) уменьшается до 0,033–0,039 м<sup>3</sup>/с.

После фиксации фурмы и начала подачи гранулированного магния в ИК образуется парогазовая смесь, объем которой резко возрастает с увеличением количества подаваемого магния. Так, если при испарении минимального количества гранулированного магния равного 3,0 кг/мин, образовавшийся объем парогазовой смеси составляет 0,096 м<sup>3</sup>/с (кривая 6, положение III), то увеличение его расхода до возможного максимального значения, равного 25,0 кг/мин, будет сопровождаться увеличением объема парогазовой смеси до

0,397 м<sup>3</sup>/с (кривая 5, участок № 4). Поскольку на практике в реальных условиях десульфурация чугуна осуществляется, как правило, с расходом гранулированного магния изменяющимся в диапазоне от 8,0 до 15,0 кг/мин, то и величина образующейся при этом паромagneйовой смеси составляет, соответственно, 0,136–0,244 м<sup>3</sup>/с (кривые 3 и 4, участок № 4). Этими объемами, в конечном итоге, и определяется частота изменения той выталкивающей силы, которую мы называем технологической, так как она появляется с момента начала продувки и действует до завершения процесса десульфурации.

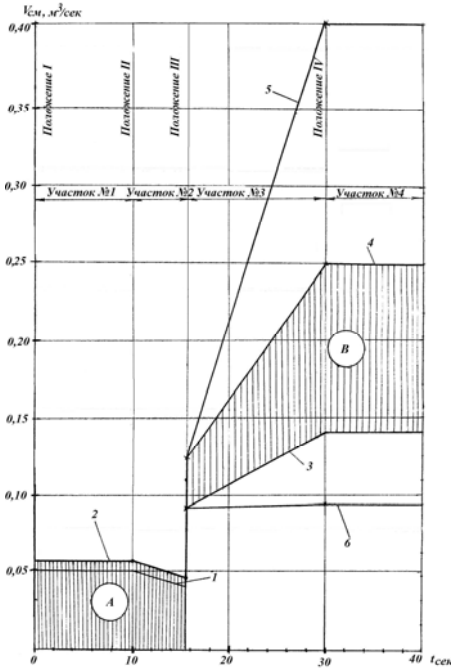
Рис.3. Величина и характер изменения объемов транспортирующего газа и парогazовой смеси.

Положение I – фурма находится над поверхностью расплава; Положение II – фурма опущилась в рабочее положение; Положение III – фурма зафиксирована механизмом зажима и началась продувка магнием; Положение IV – начался установившийся процесс десульфурации.

Участок 1 – фурма погружается в расплав; участок 2 – фурма фиксируется механизмом зажима; участок 3 – начинается продувка магнием; участок 4 и далее – идет процесс десульфурации.

Область А – зона изменения объема транспортирующего газа: кривые 1 и 2 – нижняя и верхняя границы этой зоны; область В – зона изменения объема парогazовой смеси: кривые 3 и 4 – в реальных границах изменения этой зоны;

кривые 5 и 6 – верхняя и нижняя границы изменения объема парогazовой смеси.



Выброс парогazовых пузырей в расплав из подколокольного пространства испарителя происходит периодически разовыми порциями. Возникающая при этом технологическая нагрузка изменяется циклически с абсолютной величиной и периодичностью, зависящими от таких факторов, как: особенность конструктивного исполнения фурмы, выражающееся в наличии или отсутствии колокола с ИК; форма внутренней полости ИК а также её геометрические размеры – объем, высота и соотношение размеров внутреннего и наружного диаметров нижнего среза колокола фурмы; глубина погружения фурмы в расплав; давление и расход транспортирующего газа; количество вдуваемого магния и паромagneйовой смеси, образующейся при его испарении и другие. Эта сила действует циклически и вызывает возникновение вынужденных ко-

лебаний у фурмы, которые передаются на её привод и металлоконструкции установки.

Величина этой силы определяется зависимостью:

$$F_T = F_{1T} + F_{2T} = \rho g (\Delta V_o + V_n) \quad (3)$$

и состоит из двух составляющих, каждая из которых имеет различную физическую природу. Максимальные значения этих сил для фурм с различными конструктивными параметрами приведены в табл. 1.

В уравнениях (1) – (3), на рис.1 и 2 и табл.1 приняты следующие обозначения:  $p_o$  – внешнее давление на поверхность расплава (в рассматриваемом случае атмосферное);  $p_i$  или  $p_\phi$  – абсолютное давление в любой точке расплава (в дальнейшем будем называть его ферростатическим);  $\rho$  – плотность расплава, равная  $7200 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $1200^\circ\text{C}$ ;  $H_i$  – глубина погружения фурмы;  $V_o$  – начальный объем испарительной камеры (ИК);  $h_i$  – высота, характеризующая степень заполнения расплавом ИК;  $D, D_1, D_2, d, d_k$  и  $H_1$  – конструктивные параметры фурмы и её ИК;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Принципиальное отличие этих сил заключается в том, что первая – в течение одного технологического цикла является переменной по величине, а вторая – остается постоянной. Объясняется это тем, что величина первой силы зависит от таких конструктивных параметров ИК колокола фурмы, как:  $D_1, D_2, H_i, V_o$  и  $h_i$ . Параметр  $h_i$  является переменной величиной, зависящей от глубины погружения фурмы  $H_i$ , ферростатического давления на этой глубине и количества гранулированного магния, поступившего в ИК. Увеличение глубины погружения приводит, при прочих равных условиях, к увеличению высоты  $h_i$ , а увеличение давления парогазовой смеси в ИК способствует уменьшению этой высоты. Величина второй силы зависит только от двух конструктивных параметров нижнего среза колокола фурмы: размеров его наружного ( $D$ ) и внутреннего ( $D_1$ ) диаметров. Чем меньше разница между ними, тем меньше и величина этой силы.

Поскольку технологическая нагрузка в течение одного цикла изменяется от нуля до максимальной величины и не имеет отрицательных значений, выражение для определения её текущих значений в любое время цикла может быть представлено в виде:

$$F_T = 0,5 \cdot F_T^{\max} (\cos \beta t + 1), \quad (4)$$

где  $\beta = 2\pi / t_1$  – частота изменения технологической нагрузки;  $t_1$  – время одного цикла;  $F_T^{\max}$  – максимальное значение технологической нагрузки.

Эта зависимость отражает характер изменения технологической нагрузки. Поэтому в дальнейшем воспользуемся уравнением, представляющим косинусоиду, ось симметрии которой смещена на величину равную  $0,5 \cdot F_T^{\max}$  в сторону её отрицательных значений.

Физически частота изменения технологической нагрузки определяется количеством парогазовых пузырей, выделившихся из под колокольного пространства в единицу времени (сек). Поэтому большой практический интерес представляет определение частоты этой нагрузки, диапазона, в котором эта частота может изменяться, и факторов, от которых зависят границы изменения этого диапазона.

Определяется эта частота отношением общего объема парогазовой смеси ( $V_{см}$ ), образующейся в ИК за секунду, к объему одной порции этой смеси (2), периодически выходящей в расплав, которая определяется зависимостью

$$\beta = V_{см} / V . \quad (5)$$

Рассмотрим, как решается поставленная задача, на примере фурмы, наиболее часто используемой на практике. Конструктивные параметры этой фурмы приведены в табл.1, вариант 2. Испарительная камера фурмы с такими параметрами обеспечивает устойчивое протекание процесса десульфурации, исключает зарастание внутренней полости ИК и заметалливание входного отверстия материалопровода.

Технологические параметры процесса десульфурации зависят от его интенсивности и являются величинами переменными, основными из которых являются расходы транспортирующего газа ( $V_T$ ) и гранулированного магния ( $G_M$ ), глубина погружения фурмы ( $H_i$ ), ферростатическое давление расплава ( $p_\phi$ ), а также давления транспортирующего газа ( $p_T$ ) и паров магния ( $p_M$ ) и его объема ( $V_M$ ). Анализ частоты изменения технологической нагрузки произведём для граничных значений этих параметров, то есть минимального и максимального. Это позволит определить диапазон, в котором эта частота может изменяться. Абсолютные значения этих параметров для трех случаев, имеющих место на практике, а именно: – продувка фурмы отсутствует; – фурма продувается чистым газом; – фурма продувается парогазовой смесью, приведены в табл.2.

**Анализ полученных результатов показывает,** что при погружении фурмы в расплав и до фиксации её в нижнем рабочем положении, когда она продувается чистым газом, частота изменения технологической нагрузки составляет 0,59 – 0,62 Гц. Если продувка фурмы осуществляется при минимальном попадании расплава в ИК, то есть когда  $\Delta V_o \rightarrow 0$ , частота изменения технологической нагрузки увеличивается до 0,87 Гц.

При продувке фурмы парогазовой смесью, поступление гранулированного магния в ИК изменяется в диапазоне от 3,0 до 25,0 кг в минуту. В результате его испарения образуется от 0,046 до 0,383 м<sup>3</sup> пара в секунду, частота изменения технологической нагрузки колеблется от 0,72 до 4,91 Гц, то есть резко увеличивается. Если попадания жидкого чугуна в ИК фурмы не происходит, то эта частота увеличивается до 6,4 Гц.

На практике в реальных условиях десульфурация чугуна осуществляется с расходом гранулированного магния, изменяющимся от 8,0 до 15,0

кг/мин. Это приводит к тому, что в результате его испарения образуется от 0,14 до 0,25 м<sup>3</sup> пара в секунду. В этом случае частота изменения технологической нагрузки изменяется от 1,97 до 3,26 Гц, а в отдельных случаях, при отсутствии попадания расплава в ИК, она может увеличиваться до 4,25 Гц.

На рис.4, а и б приведены кривые, иллюстрирующие величину технологической нагрузки и частоту её изменения при продувке фурмы чистым газом (а) и парогазовой смесью (б) на глубине 2,0 м. Как видно из этих рисунков величина этой силы в обоих случаях имеет одинаковое значение равное 5,25 кН. Частота же изменения этой силы, в первом случае, составляет 0,65 Гц, а во втором – 3,2 Гц, то есть увеличивается более чем в 5 раз.

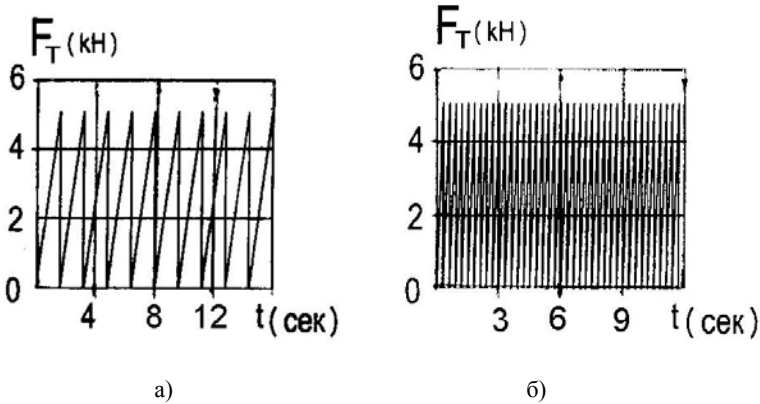


Рис.4. Изменения технологической нагрузки при продувке фурмы: а – чистым газом; б – парогазовой смесью

**Выводы.** Получены аналитические зависимости, позволившие определить механизм образования вынужденных колебаний, амплитуду и частоту их изменения во времени в зависимости от конструктивных параметров фурмы, режимов дутья и интенсивности процессов парообразования при испарении магния.

Результаты расчетов позволили оценить диапазон частот вынужденных колебаний фурмы под действием технологической нагрузки, передающихся на её привод и металлоконструкцию установки. Установлено, что эти колебания являются низкочастотными, а частота их изменения даже при самом интенсивном режиме десульфурации не превышает 6,5 Гц.

Зная величину и частоту изменения технологической нагрузки, разработчики механического оборудования, реализующего эту технологию, могут правильно определять его основные конструктивные и режимные параметры, а также выбирать такую частоту его собственных колебаний, которая обеспечит работу этого оборудования с минимальными динами-



ческими нагрузками и исключит возникновение резонансных явлений при его работе.

1. *Совершенствование* технологии и оборудования десульфурации чугуна с заменой порошковой смеси извести с магнием на чистый гранулированный магний на Уханьском металлургическом комбинате / А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, А.С.Вергун, В.А.Александров, А.М.Башмаков и др. // Труды VII Международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали. – ALMAMET. АНИФ, Австрия. – 2002. – С.2–8.
2. *Современные* комплексы внедоменной десульфурации чугуна вдуванием магния и скачивания шлака / В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, В.А.Александров, Э.А.Троценко, Б.В.Двоскин, А.С.Вергун, А.М.Башмаков и др. // Труды Международной н.-т. конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь», «Теория и практика производства чугуна». – Кривой Рог. – 2004. – С.101–111.
3. *Технологические* нагрузки, действующие на фурму при десульфурации чугуна магнием / А.М.Башмаков, В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, Ю.И.Черевик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 3. – С.11–15.
4. *Большаков В.И., Черевик Ю.И., Башмаков А.М.* Нагрузки, действующие на фурму при десульфурации // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 5. – С. 128–131.
5. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 238 с.

*Статья рекомендована к печати:  
заместитель ответственного редактора  
раздела «Металлургическое машиноведение»  
канд.техн.наук В.В.Веревев  
докт.техн.наук А.С.Вергун*

***В.І.Большаков, Ю.І.Черевик, О.М.Баишмаков***

**Оцінка частоти зміни технологічного навантаження, діючого на фурму при десульфуратії чавуну**

Метою роботи було визначення раціональних конструкційних і режимних параметрів устаткування, що реалізує технологію позапичної десульфуратії чавуну. Одержано аналітичні залежності, що дозволили визначити механізм утворення вимушених коливань, величину та частоту їх зміни залежно від конструктивних параметрів фурми, режимів дуття та інтенсивності процесів пароутворення при випаровуванні магнію. Показано, що знання величин і характеру зміни технологічного навантаження, що діє на фурму і її привід дозволяє забезпечити високу надійність і довговічність устаткування.