

В.И.Большаков, А.М.Башмаков, А.Ф.Шевченко, Ю.И.Черевик

**ОСОБЕННОСТИ СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ФУРМ С
ИСПАРИТЕЛЬНЫМИ КАМЕРАМИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ
ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА**

Исследован механизм формирования сил, действующих на фурму для десульфурации чугуна как в статике, так и при продувке. Получены аналитические зависимости, позволяющие определять характер изменения этих сил и их абсолютные значения при любой глубине погружения фурмы.

Анализ состояния проблемы.

Одной из важных задач, стоящих перед исследователями и разработчиками нового современного оборудования, предназначенного для десульфурации чугуна, является обоснование и правильный выбор оптимальных конструктивных и технологических параметров основного рабочего инструмента – фурмы. В результате её решения технологи смогут с максимальным коэффициентом полезного действия использовать дорогостоящий реагент – магний, обеспечив при этом устойчивое во времени протекание процесса десульфурации, а механики получат наиболее полное представление о характере протекания силовых процессов, происходящих во время работы оборудования. Для выбора мощности электродвигателей привода фурменного устройства, определения нагрузок, действующих в основных деталях и узлах приводных механизмов, необходимо знать величины и характер изменения сил, действующих на фурму при её погружении в расплав, подъеме и во время выполнения технологической операции.

Постановка задачи.

Для определения этих сил рассмотрим конструкции фурм, выполненных в нижней части в виде колокола с испарительными камерами (ИК) конической и цилиндрической формы (рис.1, а и б). Конструктивные параметры которых, наиболее часто используемые на практике, представлены в табл.1 [1,2].

Согласно закону Архимеда, тело, погруженное в жидкость, выталкивается из неё с силой равной весу жидкости, вытесненной этим телом. В соответствии с этим законом силу, с которой фурма, погруженная в расплав на глубину H_i , выталкивается с жидкого чугуна, можно представить в виде:

$$F_1 = V_1 \cdot \rho, \quad (1)$$

где V_1 – часть объема фурмы, вытеснившая жидкий чугун при погружении на

глубину H_i ; ρ – плотность жидкого чугуна.

Таблица 1 Конструктивные параметры форм с испарительной камерой, используемых для десульфурации чугуна

Конструктивный параметр	D	D_1	D_2	d	d_k	L	H	H_1	h	h_1
Тип фурмы	Фурма с коническим колоколом									
Величина в мм	700	180	450	350	20	3100	750	650	950	400
Тип фурмы	Фурма с цилиндрическим колоколом									
Величина в мм	550	—	260	400	20	2850	650	500	—	—

При погружении фурмы в жидкий чугун в ИК колокола находится воздух под атмосферным давлением, который в этой камере запирается, а затем сжимается ферростатическим давлением жидкого металла. По мере сжатия воздуха в ИК, она начинает постепенно заполняться жидким чугуном, её объем уменьшается, а давление воздуха в нем увеличивается. Разделительную поверхность в ИК, находящуюся на границе между сжатым воздухом и жидким чугуном, в дальнейшем будем называть пограничным слоем, который будет изменять своё положение по мере погружения фурмы в расплав (рис.1).

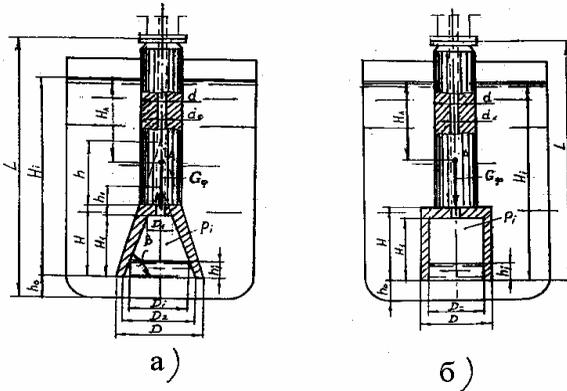


Рис.1. Расчетные схемы:
а – фурмы с коническим колоколом; б – фурмы с цилиндрическим колоколом.

Таким образом, характерной особенностью форм с ИК является наличие в этих камерах сжатого воздуха

под избыточным давлением, который, с одной стороны, давит на поверхность жидкого чугуна, а с другой – на свод ИК, создавая дополнительную выталкивающую силу, действующую на фурму. Величина этой силы для конического колокола определяется выражением:

$$F_2^* = \frac{\pi}{4} D_i^2 p_i \quad (2)$$

Давление сжатого воздуха на поверхность жидкого чугуна в ИК уравновешивается ферростатическим давлением жидкого чугуна на сжатый воздух. Это состояние равновесия пограничного слоя описывается уравнением:

$$F_2^* + F_2^1 = 0, \quad (3)$$

где F_2^1 – сила ферростатического давления поверхности жидкого чугуна ИК на сжатый воздух.

Для колокола с конической ИК она определяется выражением:

$$F_2^1 = \frac{\pi}{4} \cdot \rho D_i^2 \cdot H_i, \quad (4)$$

Подставив выражения (2) и (4) в уравнение (3), получим:

$$p_i = \rho H_i. \quad (5)$$

Изложение основных материалов исследования.

Полученная зависимость (5) позволяет определять давление сжатого воздуха в ИК колокола в зависимости от уровня погружения фурмы в расплав и плотности чугуна. Учитывая данные, приведенные в табл.1, позволяющие определить часть объема фурмы (V_l), вытеснившего жидкий чугун при погружении на глубину H_i , уравнение (1) для фурмы с коническим колоколом можно представить в следующем виде:

$$F_1 = \frac{\pi}{4} d^2 \rho (H_i - H) + \frac{\pi}{12} \rho \left[D^2 (H + h) - D_2^2 (H_1 - h_1) + D_i^2 (H_1 + h_1 - h_i) - d^2 h \right], \quad (6)$$

При погружении фурмы в расплав на внешние горизонтальные и конические поверхности колокола действует ферростатическое давление жидкого чугуна, способствуя ускорению её погружения. Величина формируемой при этом силы пропорциональна глубине погружения и контактной площади, воспринимающей ферростатическое давление, и может быть представлена для конического колокола в виде выражения:

$$F_3 = \frac{\pi}{4} \rho \left(D^2 - D_{i(1)}^2 \right) H_i. \quad (7)$$

где $D_{i(1)}$ – текущее значение диаметра конической части колокола на участке его изменения от D до d .

Аналитические зависимости, позволяющие определять силы, действующие на фурму с цилиндрическим колоколом при её погружении в расплав, имеют следующий вид:

$$F_1 = \frac{\pi}{4} \rho \left[d^2 (H_i - H) + D^2 H - D_2^2 h_i \right]; \quad (8)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot p_i; \quad (9)$$

$$F_3 = \frac{\pi}{4} \rho (D^2 - d^2) \cdot (H_i - H) . \quad (10)$$

В выражениях (1) – (10) приняты следующие обозначения: d – наружный диаметр ствола фурмы; D – наружный диаметр колокола; H – высота колокола; H_i – высота испарительной камеры; H_i – глубина погружения фурмы; h_o – расстояние между дном емкости и нижним срезом фурмы; h_i – высота заполнения ИК (уровень расположения пограничного слоя); D_i – текущий диаметр пограничного слоя; D_1 и D_2 – соответственно, верхний и нижний диаметры ИК; p_i – текущее значение давления сжатого воздуха в ИК; h_1 и h – конструктивные параметры колокола.

Анализ полученных зависимостей показывает, что фурма с ИК, погруженная в жидкий чугун, при отключенной системе пневмотранспорта, испытывает на себе действие трех сил, две из которых (F_1 и F_2) стараются вытолкнуть фурму из жидкого металла на поверхность, а одна (F_3) – препятствует выталкиванию. В зависимости от конструктивного исполнения испарительных камер эти силы имеют различные абсолютные значения (табл.2).

Таблица 2. Значение сил, действующих на фурму, при различной глубине ее погружения в жидкий чугун

$H_i, м$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,0	2,4	2,6
$p_i, ати$	0,16	0,31	0,47	0,62	0,78	0,94	1,09	1,25	1,40	1,56	1,72	1,87	2,03
Фурма с конической испарительной камерой													
$F_1, кг$	510	920	1230	1460	1630	1780	1930	2082	2230	2380	2530	2680	2890
$F_2^*, кг$	240	470	690	910	1110	1300	1480	1650	1800	1960	2110	2230	2360
$F_2, кг$	600	120 0	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000	6600	7200	7800
$F_3, кг$	100	300	590	960	1390	1850	2300	2750	3200	3650	4100	4550	5000
Фурма с цилиндрической испарительной камерой													
$F_1, кг$	370	740	1110	1350	1550	1850	1950	2150	2350	2550	2750	2950	3150
$F_2^*, кг$	85	170	250	330	420	500	580	660	750	830	910	990	1080
$F_2, кг$	370	740	1110	1480	1850	2220	2590	2960	3330	3700	4070	4440	4810
$F_3, кг$	–	–	–	130	310	480	660	830	1010	1180	1360	1530	1710

Архимедова сила (F_1) для фурм с конической и цилиндрической ИК достаточно близко совпадает между собой по величине. Сила же от давления сжатого воздуха в ИК (F_2^*) и особенно сила ферростатического давления (F_3) у фурмы с коническим колоколом значительно в 2,0÷3,0 раза превышает аналогичные силы фурмы с цилиндрическим колоколом. Значение сил F_1 и F_3 мало отличаются между собой как в статическом положении фурмы, так и при включенной системе пневмотранспорта. Сила F_2^* является переменной и её в статическом состоянии фурмы можно условно назвать «спящей» технологической нагрузкой, так как при таком состоянии фурмы она имеет свое минимальное значение.

Фурма, погруженная в жидкий металл, в статическом положении бывает достаточно редко. Как правило, пневмотрасса находится под давлением либо одного транспортирующего газа, либо газа в смеси с магнием. В качестве транспортирующего газа могут быть использованы сжатый воздух, азот, аргон или природный газ [3]. Чистым газом фурма продувается при опускании и подъеме, а газомagneйовой смесью – при обработке жидкого чугуна.

Ферростатическое давление расплава действует на фурму с момента начала её погружения и на глубине 2,0 метра достигает 1,5–1,6 ати. Режим продувки чистым газом должен быть таким, при котором жидкий чугун не будет попадать в подколокольное пространство и заплескивать подводящий трубопровод. Соблюдение этого условия будет обеспечиваться при давлении газа 1,7–1,8 ати, а расход газа при продувке погружаемой фурмы составляет 160–180 м³/час. В этом случае газ, выходя из испарительной камеры, охватывает её нижний срез по всему периметру с максимальным наружным диаметром D , а также имеем $h_i = 0$ и $D_i = D_2$.

Для этого варианта зависимости, позволяющие определять силы, действующие на фурму, имеют следующий вид:

– для фурмы с коническим колоколом

$$F_1 = \frac{\pi}{4} d^2 \rho (H_i - H) + \frac{\pi}{12} \rho [D^2 (H + h) - 2D_2^2 \cdot h_1 - d^2 h], \quad (11)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot p_i, \quad (12)$$

$$F_3 = \frac{\pi}{4} \rho (D^2 - d^2) \cdot (H_i - H) . \quad (13)$$

– для фурмы с цилиндрическим колоколом

$$F_1 = \frac{\pi}{4} \rho [d^2 (H_i - H) + D^2 H] \quad (14)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot p_i, \quad (15)$$

$$F_3 = \frac{\pi}{4} \rho (D^2 - d^2) \cdot (H_i - H) . \quad (16)$$

При продувке фурм чистым газом с коническим колоколом величина силы F_2 увеличивается в 3,0–3,5 раза, а у фурмы с цилиндрическим колоколом – в 4,0–4,5 раза по сравнению с теми значениями, которые она имела в статическом положении.

Результаты исследования.

Полученные аналитические зависимости позволяют установить закономерности изменения этих сил и получить их численные значения при различной глубине погружения фурмы (рис.2). Справа на рис.2 приведены

графики изменения вышеупомянутых сил для фурмы с коническим колоколом, а слева – с цилиндрическим. Сравнительный анализ этих сил показывает, что Архимедова выталкивающая сила (F_1) для фурм с коническим и цилиндрическим колоколом при глубине погружения 2,0 метра имеют практически одинаковые значения и составляют, соответственно, 2350 и 2550 кг. Силы же ферростатического давления (F_3) и силы (F_2), вызванные давлением сжатого воздуха в ИК, значительно отличаются друг относительно друга. Так, если на глубине 2,0 метра сила F_2 для фурмы с коническим колоколом составляет 6000 кг, то для фурмы с цилиндрическим – 3700 кг. Сила F_3 на этой же глубине равна, соответственно, 3650 и 1180 кг. Существенное отличие абсолютных значений этих сил обуславливается различием у них таких конструктивных параметров как наружные диаметры колоколов и центральных стволов, равных, соответственно 700 и 550 мм, а также 350 и 400 мм.

Учитывая, что вес новой фурмы составляет около 2500 кг, можно оценить какие силы доминируют при её погружении в расплав, например, на глубину 2,0 метра. Для этого необходимо проанализировать баланс сил, способствующих погружению и всплытию фурмы. Проведенный анализ показывает, что для фурм обеих конструкций справедливо условие

$$F_1 + F_2 > F_3 + G_{\phi}, \quad (17)$$

которое свидетельствует о том, что силы, способствующие всплытию, превышают силы, обеспечивающие погружению фурм. Причем, разница между этими силами составляет 2230 и 2570 кг, соответственно.

Наличие этой информации позволяет разработчикам правильно определять вес и конструктивные параметры штанг и балластного груза фурменного устройства, обеспечивающего выполнение условия, описываемого уравнением

$$F_1 + F_2 = F_3 + G_{\phi} + G_{ш} + G_{\sigma}, \quad (18)$$

где G_{ϕ} – вес фурмы; $G_{ш}$ – вес штанги; G_{σ} – вес балластного груза, то есть того условия, которое обеспечивает фиксирование фурмы на заданном расстоянии от дна емкости при её свободном опускании с продувкой чистым газом.

Кроме указанных сил, на фурму, при погружении в жидкий металл, извлечении из него и при продувке, в зоне нижнего среза сопла действует реактивная сила, обусловленная наличием высокоскоростной струи газа или газомagneйной смеси (рис.3).

Величина этой силы определяется с помощью уравнения количества движения, которое для нашего случая имеет вид [4]:

$$P = \frac{G_{\Gamma} + G_{\text{M}}}{g} \cdot V_o,$$

где G_{Γ} и G_{M} – секундные весовые расходы газа и магния;

$\frac{G_T}{g}$ и $\frac{G_M}{g}$ – секундные массы газа и магния;

V_0 – средняя скорость истечения.

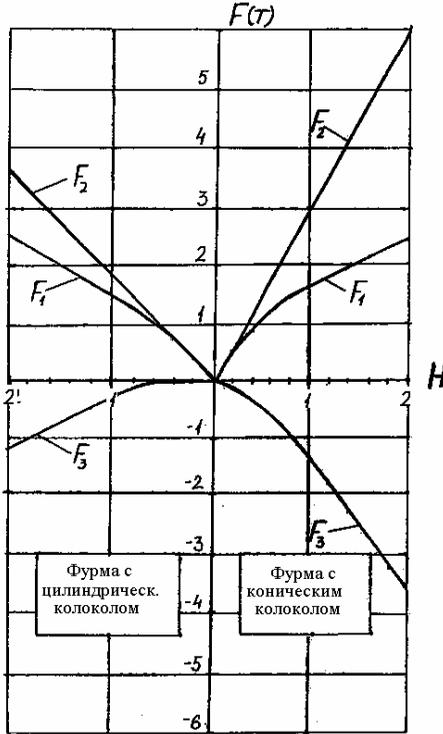


Рис.2. Характер изменения сил, действующих на фурму при её погружении с продувкой чистым газом: справа – фурма с коническим колоколом; слева – фурма с цилиндрическим колоколом.

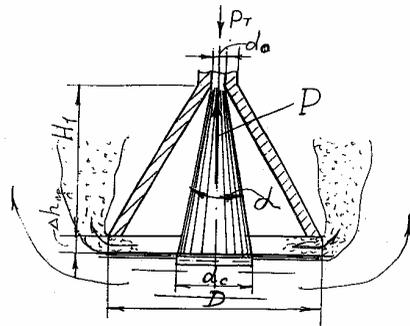


Рис.3. Расчетная схема

На рис.4 приведено семейство кривых, представляющих зависимости

изменения реактивной силы при различных скоростях истечения газа (кривые 1–7) и газомagneйевой смеси (кривые 1'–7') равной 50, 100, 150, 200, 250, 300 и 350 м/с. Эти кривые получены при различных секундных весовых расходах газа и магния (табл.3).

Таблица 3. Значение секундных весовых расходов транспортирующего газа магния и газомagneйевой смеси

Расход транспортирующего газа	M ³ /ч M ³ /с	200	180	160	140	120	100	80	60	40	
		кг	0,055	0,050	0,044	0,039	0,033	0,028	0,022	0,017	0,011
Вес транспортирующего газа, G _T	2,0 ати	кг	0,132	0,120	0,106	0,094	0,079	0,067	0,053	0,041	0,026
	3,0 ати	кг	0,226	0,205	0,181	0,160	0,135	0,115	0,090	0,070	0,045

Массовая скорость подачи магния, G_m	скорость подачи	кг/мин	—	—	—	—	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
		кг	—	—	—	—	0,083	0,167	0,250	0,333	0,417
Вес смеси ($G_r + G_m$)	2,0 ати	кг	—	—	—	—	0,162	0,234	0,303	0,374	0,443
	3,0 ати	кг	—	—	—	—	0,220	0,282	0,340	0,403	0,462

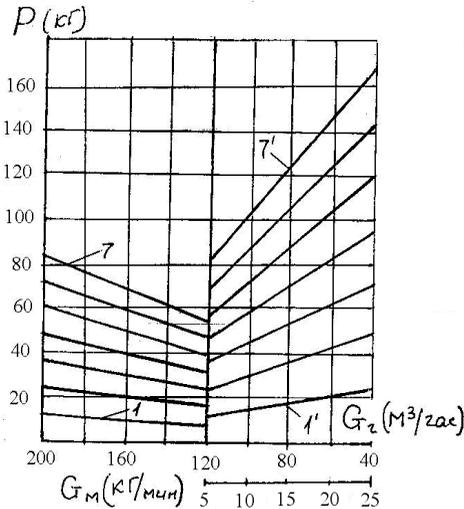


Рис. 4. Изменение реактивной силы при различных скоростях истечения газа и газомagneвовой смеси. Кривые 1–7 — реактивная сила при скорости истечения чистого газа носителя 50, 100, 150, 200, 250, 300 и 350 м/с.. Кривые 1'–7' — реактивная сила при скорости истечения газомagneвовой смеси 50, 100, 150, 200, 250, 300 и 350 м/с.

Анализ полученных зависимостей показывает, что в зоне продувки фурмы чистым газом при ее опускании и подъеме максимальные значения реактивной силы не превышают 80,0 кг. Во время продувки фурмы газомagneвовой смесью эта сила увеличивается до 160 кг. В реальных условиях эти силы имеют еще меньшие значения. Сравнивая эту силу с другими, действующими на фурму, видим, что она значительно уступает им по величине и не превышает 5% меньшей из них, поэтому при дальнейших исследованиях влияние этой силы из-за ее малости можно не учитывать.

Выводы.

Исследование особенностей силового нагружения фурм с испарительными камерами позволило получить достаточно полную картину о силах, действующих на фурму, погружаемую в жидкий чугун как в статическом положении, так и при продувке испарительной камеры чистым транспортирующим газом или газомagneвовой смесью. Получены аналитические зависимости, позволяющие определять характер изменения этих сил и их абсолютные значения при любой глубине погружения фурм. Установлено, что влияние реактивной силы, образующейся в зоне нижнего среза сопла в результате действия на фурму высокоскоростной струи и газомagneвовой смеси, не оказывает существенного влияния на характер нагружения фурмы в целом, поэтому при дальнейших исследованиях ею можно пренебречь. Полученная информация о действующих нагрузках и законах их

изменения позволит грамотно выполнять расчеты деталей и узлов фурмы и их приводных механизмов на прочность и долговечность.

1. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 239 с.
2. *Анализ конструкций фурм и устройств, используемых для десульфурации чугуна / В.М.Большаков, А.М.Башмаков, А.Ф.Шевченко, Ю.И.Черевик //* Фундаментальные и прикладные проблемы металлургии. – Вып. 8. – 2004. – С.381–389.
3. *Шевченко А.Ф.* Разработка и развитие теории и технологии процессов внепечной десульфурации чугуна в ковшах вдуванием диспергированных реагентов // Диссертация на соискание ученой степени докт.техн.наук. – Днепропетровск, 1997. – 425 с.
4. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. – Наука. 1969. – 824 с.
5. *Расчетная оценка скорости газового потока при условии вдувания магния в жидкий чугун / А.Ф.Шевченко, С.А.Шевченко, А.П.Толстопят, В.И.Елисеев //* Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Сб. тр. ИЧМ. – Киев. Наукова думка. – 2003. – Вып.6. – С.116–120.
6. *Чайдлс У.* Физические постоянные. – Физматгиз. 1961. – 67 с.

Статья рекомендована к печати д.т.н. А.С.Вергуном