

Романович А.А., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОМОЛА МАТЕРИАЛОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ В ПРЕСС-ВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ**

alexejrom@yandex.ru

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по изучению процесса помола материалов, предварительно измельченных в пресс-валковом измельчителе, в шаровой мельнице, оснащенной энергообменными устройствами. Представлены уравнения регрессии, полученные в результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ. Изучено влияние коэффициентов загрузки мелющими телами первой и второй камер мельницы, их длин, углов наклона и взаимного расположения энергообменных устройств (эллипсного сегмента и лопасти двойного действия) на выходные показатели процесса измельчения (приведенную производительность, потребляемую мощность привода и удельные энергозатраты). Установлено, что наилучшие результаты процесса дезагрегации и помола, судя по минимальным удельным энергозатратам при измельчении клинкера с анизотропной текстурой, полученной после силового деформирования между валками пресс-валкового измельчителя, равные  $q_{\min} = 22,7 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$  ( $Q = 170 \text{ кг}/\text{ч}$ ), достигаются при: угле наклона эллипсного сегмента  $\alpha = -30^\circ$ ; длине первой камеры  $l_1 = 0,6 \text{ м}$  и коэффициентах загрузки камер мелющими телами  $\varphi_1 = 0,16$ ;  $\varphi_2 = 0,3$ .

**Ключевые слова:** энергообменные устройства, шаровая мельница, производительность, удельный расход энергии, анизотропная текстура.

**Введение.** Согласно статистическим данным по показателю объема производства потребление энергии в России составляло 0,42 кг нефтяного эквивалента (кг н. э.) на 1 доллар ВВП. В то же время в развитых странах, таких, как Германия, Франция, Япония, Индия этот показатель не превышает – 0,14, в США – 0,19, а в Канаде – 0,25. Энергоемкость производства цемента и клинкера в России почти в два раза выше аналогичного показателя в развитых странах. В производстве цемента наилучшие мировые показатели энергоемкости находятся в диапазоне 0,09...0,11 ГД ж/т. Энергоемкость российских предприятий в этой отрасли не опускается ниже 0,2 ГД ж/т [1, 2].

При производстве вяжущих материалов одним из энергоемких процессов является тонкое измельчение шихты, реализуемое главным образом в барабанных мельницах. Однако, не смотря на кажущуюся простоту конструкции и эксплуатации, барабанные мельницы реализуют в себе не эффективный способ измельчения материалов, при котором большая часть подводимой механической энергии затрачивается на нагрев мелющих тел и измельчаемых материалов, на шумовой эффект и др., что значительно повышает энергозатраты на помол. Так, например, в среднем на помол одной тонны цемента в шаровых мельницах расходуется около 35...40 кВт·ч электроэнергии. Кроме того, реализация в шаровых мельницах сразу нескольких режимов измельчения представляет собой определенные трудности и снижает эффективность помола.

Одним из перспективных направлений как у нас в стране, так и за рубежом, является разработка энергосберегающих систем измельчения материалов с вынесением стадии грубого помола в пресс-валковый измельчитель (ПВИ) [3, 4]. Реализация в цементном производстве постадийного способа измельчения за счет создания энергосберегающих агрегатов для измельчения материалов с использованием пресс-валковых измельчителей, позволяет повысить производительность и уменьшить удельные энергозатраты 20...40 % [1, 3].

**Основная часть.** Анализ литературных данных [5, 6] и проведенные экспериментальные исследования показали, что в пресс-валковом измельчителе осуществляется значительная часть процесса помола материала. Однако при работе ПВИ в открытом цикле измельчения необходим окончательный помол материала в отдельном агрегате – в частности, в шаровой мельнице. Учитывая, что измельченный в ПВИ материал обладает специфическими свойствами, он имеет анизотропную текстуру и форму в виде спрессованных пластин, с максимальной прочностью в направлении силового воздействия, а составляющие частицы – микродефектную структуру, то для его эффективной дезагрегации и последующего тонкого измельчения целесообразно подвергать ударно-сдвиговому воздействию шаровой загрузки в первой камере мельницы и раздавливающе-сдвиговому – во второй. Такое воздействие мелющих тел можно получить установив в барабане мельницы энергообменные устройства (ЭУ): лопасть двойного действия (ЛДД) и эллипсный сегмент (ЭС).

Однако эффективность процесса измельчения материалов в ШМ с ЛЭУ зависит от многих факторов: схемы установки ЭУ, взаимного положения ЛДД и ЭС, коэффициентов загрузки камер мельницы, их длин и др. С целью определения их рациональных величин нами были проведены экспериментальные исследования по изучению рациональных условий помола предварительно измельченного в ПВИ материала в ШМ, оснащенной ЭУ.

С применением метода математического планирования эксперимента по ЦКОП-2<sup>5</sup> была изучена зависимость  $E, Q, N, q = f(\varphi_1; \varphi_2; L_1; \alpha; \xi)$ . За исследуемые параметры были приняты: коэффициенты загрузки мелющими телами первой

$\varphi_1$  и второй  $\varphi_2$  камер мельницы, длина первой камеры  $l_1$ , угол наклона ЭС  $\alpha$  и угол их смещения ЭС и ЛДД  $\xi$  относительно друг друга.

Для оценки эффективности процесса дезагломерации и помола клинкера с анизотропной текстурой, полученной после измельчения в ПВИ, в ШМ с ЭУ в качестве выходных параметров были приняты: производительность  $Q$ , приведенная к суммарному остатку на сите  $\Sigma R_{008}$ , равном 10 %, потребляемая мощность приводом  $N$  и удельный расход электроэнергии  $q$ .

Проведенные поисковые исследования позволили установить рациональные уровни варьирования факторов, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования фактов

Факторы	Кодир. обозначения	Величина шага	Значение варьируемых параметров				
			-1,547	-1	0	1	1,547
$\varphi_1$	$X_1$	0,02	0,149	0,16	0,18	0,2	0,211
$\varphi_2$	$X_2$	0,02	0,269	0,28	0,3	0,32	0,331
$l_1, \text{ м}$	$X_3$	0,15	0,42	0,5	0,65	0,8	0,88
$\alpha, \text{ град}$	$X_4$	30	-48,2	-30	0	30	48,2
$\xi, \text{ град}$	$X_5$	90	-139,2	-90	0	90	139,2

После обработки результатов исследований на ЭВМ были получены уравнения, которые в кодированной форме имеют вид:

$$Q = 166,5663 - 9,7\varphi_1 + 446\varphi_2 + 103,84l_3 + 0,02\alpha - 0,02\xi + 1435\varphi_1\varphi_2 - 2,7\varphi_1^2 - 67\varphi_1l_1 - 0,523\varphi_1\alpha - 0,01\varphi_1\xi - 11000\varphi_2^2 + 41,33\varphi_2l_1 - 0,315\varphi_2\alpha + 0,07\varphi_3\xi - 294,9l_1^2 + 0,0069l_4\alpha + 0,011l_1\xi + 0,04\alpha_5 \quad (1)$$

– для определения потребляемой мощности привода:

$$N = 3,3 - 4,37\varphi_1 + 16\varphi_2 - 0,5l_1 - 0,02\alpha + 117,5\varphi_1^2 + 52,5\varphi_1\varphi_2 - 3,64\varphi_1l_1 + 0,01\varphi_1\alpha + 0,002\xi - 85\varphi_2^2 - 8,75\varphi_2l_1 + 0,05\varphi_2\alpha - 0,006\varphi_2\xi - 302l_1\varphi_2 - 0,0003\xi^2 \quad (2)$$

– для определения удельного расхода электроэнергии:

$$q = 22,813 - 32,5\varphi_1 + 36,6\varphi_2 + 18,8l_1 + 0,02\alpha + 1885\varphi_1^2 + 64,1l_1^2 - 0,03\alpha^2 + 0,0004\xi^2 + 2302\varphi_2^2 - 102,5\varphi_1\varphi_2 + 0,037\varphi_1\alpha + 11,33\varphi_1l_1 - 0,02\varphi_1\xi + 23\varphi_2l_1 + 0,06\varphi_2\alpha - l_1^2 + 0,0002l_1\xi \quad (3)$$

При помощи ЭВМ по уравнениям регрессии были получены графические зависимости  $Q, N, q = f(\varphi_1, \varphi_2, l_1, \alpha, \xi)$ , представленные на рис. 1...4.

Анализ графической зависимости  $Q, N, q = f(\varphi_1, l_1)$  (рис.1) позволил установить, что при увеличении коэффициента загрузки мелющими телами первой камеры мельницы в диапазоне от  $\varphi_1 = 0,149$  до  $\varphi_1 = 0,211$  потребляемая мощность возрастает пропорционально с  $N = 4,15 \cdot 10^3$  Вт до  $N = 4,55 \cdot 10^3$  Вт на 8,5 %.

Приведенная производительность возрастает пропорционально приросту массы мелющих тел в первой камере от 0,149 до 0,16 с  $Q = 164,1$  кг/ч до  $Q = 165,7$  кг/ч, т.е. на 1...2 %. Однако, при дальнейшем увеличении  $\varphi_1$  до  $\varphi_1 = 0,211$  наблюдается уменьшение величины прироста  $Q$  – с  $Q = 165,7$  кг/ч до  $Q = 166,4$  кг/ч (менее 1 %). Удельный расход электроэнергии при ( $l_1=0,6$  м) остается практически неизменным и равным  $q = 22,7...23,5$  Вт·ч/кг.

Из вышесказанного вытекает следующий вывод, что наиболее эффективно процесс из-

мельчения, исходя из величины удельных энергозатрат, осуществляется при

$\varphi_1 = 0,16$ , что значительно ниже, чем при измельчении клинкера традиционным способом в шаровой мельнице (без ПВИ).

При изменении длины первой камеры (рис. 1, а) в диапазоне от  $l_1 = 0,42$  м до  $l_1 = 0,88$  м приведенная производительность изменяется по зависимости, имеющей экстремум при  $l_1 = 0,6$  м. Изменение длины первой камеры мельницы в ту или в другую сторону приводит к уменьшению производительности. Так при уменьшении длины первой камеры от  $l_1 = 0,6$  м до  $l_1 = 0,42$  м (рис. 1, в) наблюдается рост удельного расхода электроэнергии с  $q = 22,7$  Вт·ч/кг до  $q = 23,7$  Вт·ч/кг, т.е. на 4,5 %. Увеличение длины первой камеры до  $l_1 = 0,88$  м приводит к увеличению  $q$  до  $q = 24,9$  Вт·ч/кг – на 9,7%. Это указывает на то, что рациональная длина первой камеры при помоле клинкера предварительно измельченного в ПВИ равна  $l_1 = 0,6$  м, что соответствует  $l_1 = 0,3L$ , где  $L$  – длина барабана мельницы.

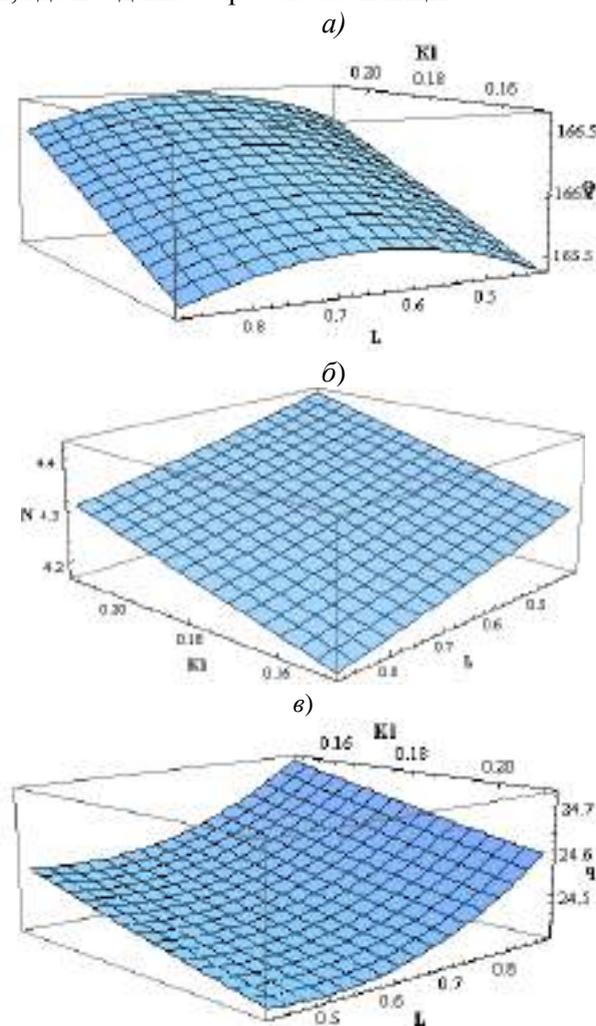


Рис. 1. Влияние величины загрузки мелющими телами первой камеры на  $Q, N, q$  при различной ее длине, ( $\varphi_2 = 0,3$ ;  $\xi = 0$ ;  $\alpha = -30^\circ$ )

Анализ графической зависимости (рис. 2)  $Q, N, q = f(\varphi_2, \alpha)$  показал, что при изменении угла наклона ЭС от вертикальной оси мельницы ( $\alpha = 0^\circ$ ) на угол  $\alpha = -30^\circ$  (равно 0,53 радиан) от днища мельницы происходит прирост приведенной производительности с  $Q = 158$  кг/ч до  $Q = 159,5$  кг/ч – на 3,9 %. Удельные энергозатраты же при изменении  $\alpha$  в этом диапазоне ( $\alpha = 0^\circ \dots -30^\circ$ ), снижаются до экстремума  $q = 23,0$  Вт·ч/кг. Дальнейшее увеличение угла наклона ЭС до  $\alpha = -48,2^\circ$  приводит к росту удельных энергозатрат с  $q = 23,0$  Вт·ч/кг до  $q = 23,7$  Вт·ч/кг (на 3 %) и более существенному приросту  $N$  на 5 % ( $N = 4,2 \cdot 10^3$  Вт до  $N = 4,4 \cdot 10^3$  Вт). Это объясняется тем, что при наклоне ЭС, в сторону разгрузочного днища мельницы на угол  $\alpha = 48^\circ$  осуществляется смешанный режим работы мелющих тел во второй камере мельницы, так как часть мелющей загрузки захватывается ЭС и поднимается на большую высоту, создавая тем самым водопадный режим измельчения, вместо требуемого каскадного. При этом, несмотря на то, что совершается большая работа мелющей загрузкой, это не приводит к существенному приросту приведенной производительности  $Q$  (с  $Q = 159,5$  кг/ч до  $Q = 160,2$  кг/ч). Удельные энергозатраты при этом возрастают более существенно с  $q = 23,0$  Вт·ч/кг до  $q = 25,5$  Вт·ч/кг, т.е. на 10,8 %, что обусловлено более значительным приростом  $N$ . Увеличение угла наклона ЭС в сторону разгрузочного днища мельницы до  $\alpha = 48,2^\circ$  ведет к приросту  $N$  на 4,8 % ( $N = 4,2 \cdot 10^3$  Вт до  $N = 4,4 \cdot 10^3$  Вт), при незначительном росте  $Q$  (с  $Q = 159,5$  кг/ч до  $Q = 160,2$  кг/ч), что сказывается на росте  $q$  с  $q = 23,7$  Вт·ч/кг до  $q = 25,5$  Вт·ч/кг (на 6,7 %).

Из вышесказанного следует, что при помоле предварительно измельченных в ПВИ материалов с анизотропной текстурой, наиболее рациональным является угол наклона ЭС, равный  $30^\circ$  (0,53 радиан), а эллипсный сегмент должен быть наклонен от разгрузочного днища мельницы. Это объясняется тем, что данное расположение ЭС способствует интенсивному раздавливающе-истирающему воздействию мелющей загрузки на измельчаемый материал, при этом не нарушается каскадный режим работы мельницы в камере домола.

Увеличение коэффициента загрузки мелющими телами второй камеры от  $\varphi_2 = 0,269$  до  $\varphi_2 = 0,331$  ведет к незначительному пропорциональному приросту приведенной производительности и потребляемой мощности приводом, что вызывает небольшой рост удельных энергозатрат. Это свидетельствует, что усиление раздавливающе-сдвигового деформирования поло-

жительно сказывается на процессе помола материалов с анизотропной текстурой.

Из анализа графической зависимости  $Q, N, q = f(\xi, \varphi_2)$  (рис. 3) установлено, что взаимное расположение ЛДД и ЭС в барабане мельницы оказывает существенное влияние на процесс помола материалов с анизотропной текстурой.

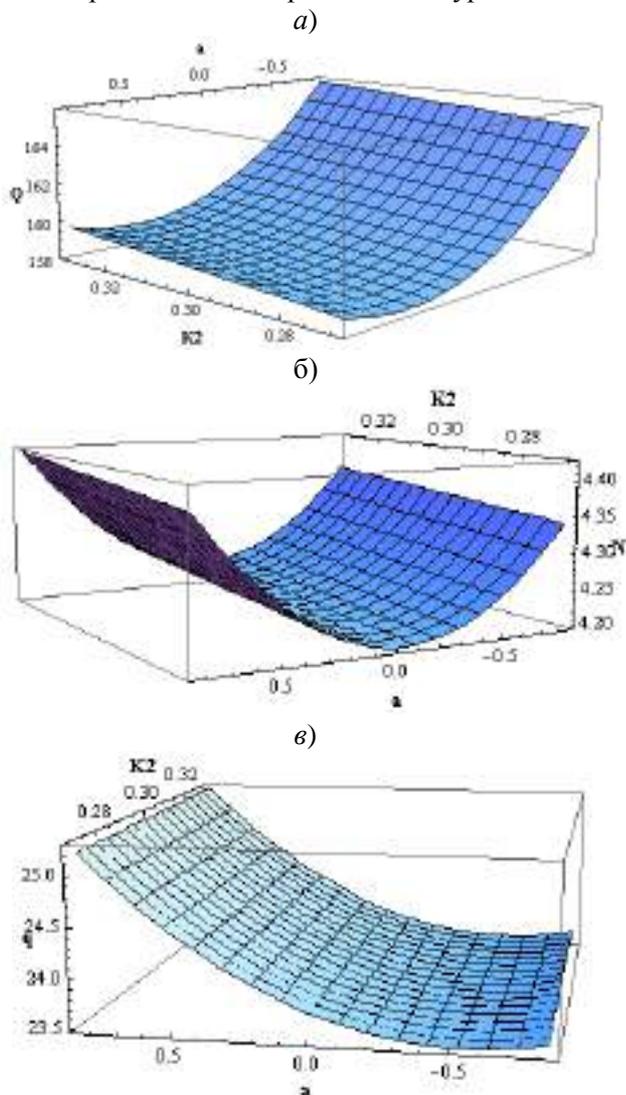


Рис. 2. Влияние угла наклона ЭС на  $Q, N, q$  при различной величине загрузки мелющими телами второй камеры, ( $\varphi_1 = 0,16$ ;  $\xi = 0^\circ$ ;  $l_1 = 0,6$ )

Так, расположение ЛДД и ЭС в барабане мельницы, когда их рабочие поверхности параллельны между собой позволяет получить наилучшие результаты выходных показателей ( $Q = 170$  кг/ч;  $q = 22,7$  Вт·ч/кг при  $(\varphi_2, \varphi_1, \alpha; l_1 = \text{const})$ .

Об этом свидетельствуют экстремумы исследуемых функций. Это объясняется тем, что такое расположение энергообменных устройств в барабане мельницы способствует созданию интенсивного раздавливающе-истирающего воздействия мелющих тел на измельчаемый материал. При изменении вышеуказанного расположения энергообменных устройств (поворот

ЭС относительно ЛДД по ходу или против хода вращения барабана мельницы) приводит к ухудшению процесса помола материала. Так, например, поворот ЭС относительно ЛДД по направлению вращения барабана на величину угла от  $\xi = 0^\circ$  до  $\xi = 139,2^\circ$  (2,426 радиан) приводит к приросту потребляемой мощности привода с  $N = 3,86 \cdot 10^3$  Вт до  $N = 4,8 \cdot 10^3$  Вт, т.е. на 20 % и к снижению приведенной производительности с  $Q = 170$  кг/ч до  $Q = 140,2$  кг/ч, т.е. на 10,2 %. Такое изменение  $N$  и  $Q$  сказывается на величине удельных энергозатрат, которые возрастают с  $q = 22,7$  Вт·ч/кг до  $q = 34,2$  Вт·ч/кг – на 33,6 %.

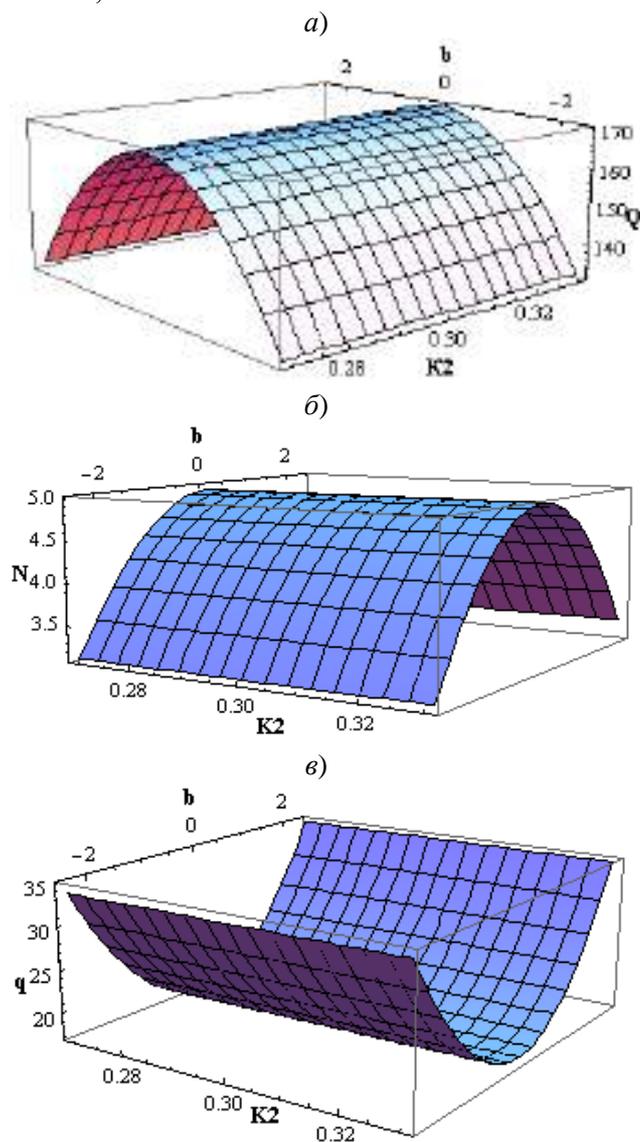


Рис. 3. Влияние угла смещения ЭС относительно ЛДД на  $Q, N, q$  при различной величине загрузки мелющими телами второй камеры, ( $\varphi_1 = 0,16$ ;  $\alpha = -30^\circ$ ;  $l_1 = 0,6$  м)

При смещении ЭС на ту же величину угла в противоположном направлении приводит также к ухудшению выходных показателей процесса помола. Снижение эффективности процесса по-

мола при повороте ЭС относительно ЛДД в ту или другую сторону объясняется созданием во второй камере мельницы условий, при которых часть мелющей загрузки работает в водопадном режиме. Такое движение мелющих тел обеспечивается за счет образования между ЭУ пространственной трапецидальной фигуры, что способствует поднятию мелющей загрузки на большую высоту. Не симметричный характер изменения показателей при одинаковом угле поворота ЭС «по» и «против» направлений вращения барабана обусловлен различным пространственным положением их относительно друг друга.

При увеличении коэффициента загрузки мельницы мелющими телами (рис. 3) от  $\varphi_2 = 0,269$  до  $\varphi_2 = 0,3$  (при  $\xi = 0^\circ$ ) наблюдается незначительное снижение удельного расхода электроэнергии  $q = 23,8$  Вт·ч/кг до  $q = 22,7$  Вт·ч/кг, т.е. на 4,6%. Это обусловлено более быстрым приростом производительности, чем потребляемой мощности приводом. Дальнейшее увеличение  $\varphi_2$  до  $\varphi_2 = 0,331$  не приводит к существенному улучшению выходных показателей.

Это указывает на необходимость поддержания коэффициента загрузки мелющими телами второй камеры мельницы равным  $\varphi_2 = 0,3$  при помоле в шаровой мельнице, оснащенной энергообменными устройствами материалов предварительно измельченных в ПВИ.

Анализ графической зависимости  $Q, N, q = f(l, \alpha)$  (рис. 4) позволил установить влияние длин камер на выходные параметры шаровой мельницы при различном угле наклона эллипсного сегмента.

Экстремумы функций, описывающих изменение производительности  $Q$  и удельных энергозатрат  $q$  при различном угле наклона лопастного эллипсного сегмента, соответствуют положению длины первой камеры на графиках, равному  $l_1 = 0,6$  м.

Изменение угла наклона лопастного эллипсного сегмента  $\alpha$  от вертикального положения в ту или другую сторону до  $\alpha = -48,2^\circ$  и  $\alpha = 48,2^\circ$  (рис. 4) влечет за собой изменение характера воздействия эллипсного сегмента на мелющую загрузку, что отрицательно сказывается на производительности агрегата. Изменение длины первой камеры от положения  $l_1 = 0,6$  м, приводит к снижению производительности мельницы, так как при уменьшении её длины более грубый продукт поступает в камеру тонкого помола, а при увеличении её длины, уменьшается вторая камера мельницы, что не обеспечивает требуемого качества помола. Наилучшие результаты процесса дезагрегации и помола, судя по минимальным удельным энер-

гозатратам при измельчении клинкера с анизотропной текстурой, полученной после силового деформирования между вальками пресс-валькового измельчителя, равные  $q_{\min} = 22,7$  Вт·ч/кг ( $Q = 170$  кг/ч), достигаются при: угле наклона эллипсного сегмента  $\alpha = -30^\circ$ ; длине первой камеры  $l_1 = 0,6$  м; коэффициентах загрузки камер мелющими телами  $\varphi_1 = 0,16$ ;  $\varphi_2 = 0,3$ ; при этом угол смещения ЛДД относительно ЭС равен  $\xi = 0^\circ$ .

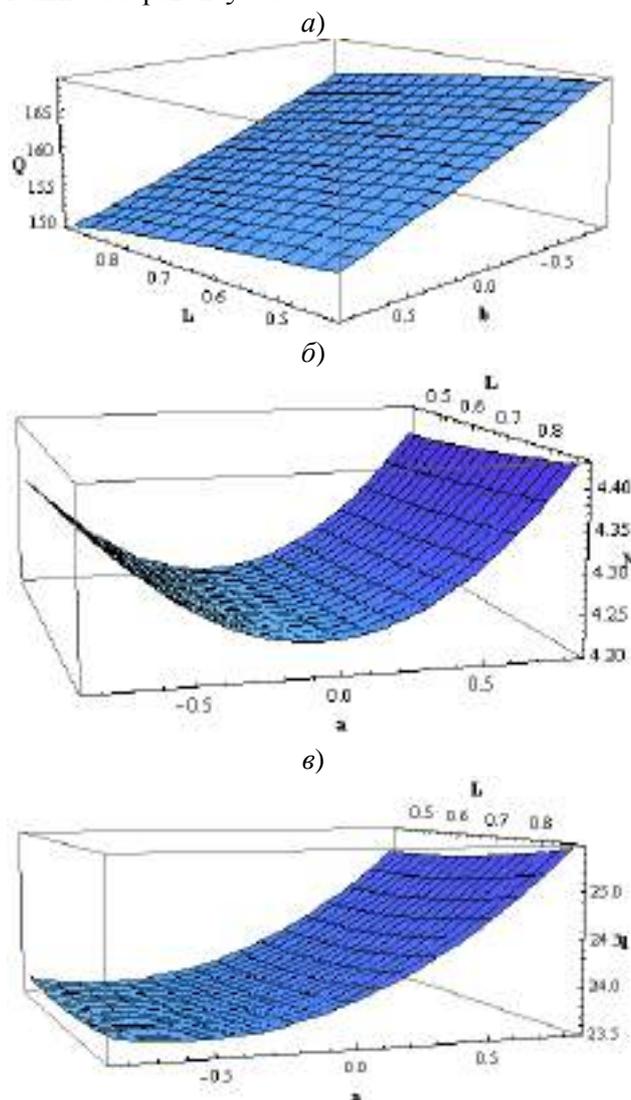


Рис. 4. Влияние длины первой камеры на  $Q, N, q$  при различном угле наклона ЭС:  
( $\varphi_1 = 0,16$ ;  $\xi = 0^\circ$ ;  $\varphi_2 = 0,3$ )

**Вывод.** Таким образом, проведенные экспериментальные исследования по изучению процесса дезагломерации и помола предварительно измельченных в ПВИ материалов и имеющих анизотропную текстуру в шаровой мельнице, оснащенной ЭУ, свидетельствуют о целесообразности реализации ударно-сдвигового воздействия шаровой загрузки в первой камере мельницы и раздавливающе-сдвигового её воз-

действия во второй. Рациональные режимы работы мелющей тел обеспечиваются при установке ЭС наклоненным от разгрузочного днища под углом  $30^{\circ}$  от вертикальной оси барабана мельницы, когда его рабочая поверхность расположена параллельно ЛДД при  $\varphi_1 = 0,16$ ,  $\varphi_2 = 0,3$ ,  $l_1 = 0,6$  м и  $\xi = 0^{\circ}$  при этом достигаются следующие результаты:  $q_{\min} = 22,7$  Вт·ч/кг,  $N = 3,86 \times 10^3$  Вт,  $Q = 170$  кг/ч.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романович А.А., Глаголев Е.С., Бабаевский А. Н. Технология получения вяжущих с использованием техногенных отходов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №5. С. 102-105.
2. Биннер Й., Ассмус Р., Щеголяев Е. Технология измельчения и классификация шлака // Цемент и его применение. 2006. № 5. С. 31-36.

3. Мельница POLYCOM фирмы KRUP Polysius AG – революция в области дробильного оборудования // Горная промышленность. 1996. №4. С. 20.

4. Tratner R. Modernisierung von Production – sanlagen Guttbett Walzenmuhlen fur Rohmaterial und Klinker // Zement – Kalk – Gips. 1987. № 7. P. 354-359.

5. Wustner H. Energy – saving with the roller press comminution process // World Cement. 1986. № 3. P. 94-96.

6. Romanovich M., Romanovich L., Rudichev A., Lycheva A. Incentives for Innovative Activity of Young Scientists on the Basis of Higher Educational Institutions in Russia // World Applied Sciences Journal. T. 25. № 12. P. 1754-1757.

---

#### Romanovich A.A.

#### STUDY OF GRINDING MATERIALS IN THE PRE-GRINDING ROLLER PRESS MILL

*The paper presents the results of experimental studies on the process of grinding materials, pre-shredded in the roller press mill, ball mill, equipped with energy-exchange devices. Presents the regression equation derived from the analysis of experimental data on a computer. The effect of load factors milling bodies of the first and second chambers of the mill, their lengths, angles and arrangement of energy-exchange devices (elliptical segment and double action blade) Weekend rates grinding process (reduced performance, power consumption of the drive and the specific energy consumption). Found that the best results of the process of disaggregation and milling, according to the minimum specific energy consumption by grinding clinker with anisotropic texture obtained after deformation force between the rollers roller press mill, equal  $q_{\min} = 22,7$  W · h / kg ( $Q = 170$  kg / h), achieved by: an inclination elliptical segment  $30^{\circ}$ ;  $-\alpha =$  the length of the first chamber  $l_1 = 0,6$  m and load factors cameras grinding bodies  $j_1 = 0,16$ ;  $j_2 = 0,3$ .*

**Key words:** energy-exchange devices, ball mill, productivity, specific energy consumption, anisotropic texture.