

УДК 620.178:677.042

**В. М. Сербин**, к.т.н., доц., Северо-Кавказский Федеральный Университет (СКФУ)

E-mail: [vmserbin@yandex.ru](mailto:vmserbin@yandex.ru)

## **Оценка влияния конструктивных и технологических параметров спиральных классификаторов на износостойкость их рабочих органов**

*Рассмотрено влияние конструктивных параметров и технологических характеристик спиральных классификаторов на интенсивность износа их рабочих органов. Даны практические рекомендации по эффективному использованию резиновой футеровки.*

**Ключевые слова:** спиральный классификатор, износ, износостойкость, геометрические параметры, технологические характеристики.

**V. M. Serbin**

## **Estimation of Influence of Constructive and Technological Parameters of Spiral Qualifiers on Wear Resistance of Their Working Bodies**

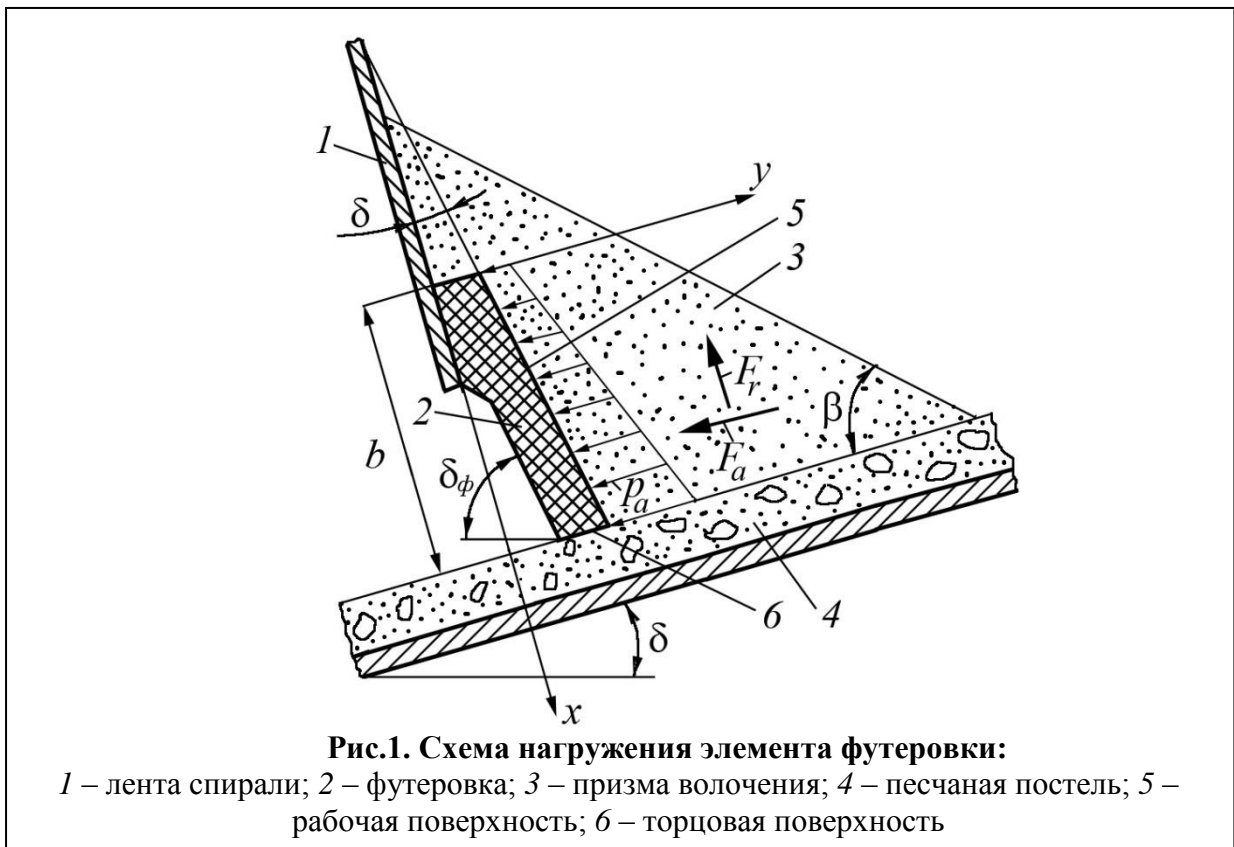
*Influence of design data and technical characteristics on spiral qualifiers on intensity of deterioration of their working bodies is considered. Practical recommendations about most effective utilisation rubber for the lining.*

**Keywords:** the spiral qualifier, deterioration, wear resistance, geometrical parametres, technical characteristics.

**Введение.** В наших предыдущих сообщениях были рассмотрены способы повышения износостойкости рабочих органов спиральных классификаторов путем совершенствования свойств их материала и конструкции футеровки [1, 2, 3]. В настоящее время также применяются и другие методы защиты от изнашивания ленты спирали и разработано большое количество модификаций как металлических, так и резиновых футеровок [4, 5]. Эти обстоятельства, а также отсутствие надежных, научно обоснованных критериев зачастую ставит перед ремонтным и обслуживающим персоналом трудноразрешимую задачу выбора оптимального способа повышения износостойкости рабочих органов классификаторов с учетом конкретных условий их эксплуатации и конструктивных особенностей. Решению этой задачи посвящено настоящее сообщение.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Известно, что в процессе работы классификаторов износу подвергается торцовая и передняя (рабочая) поверхность футеровки [1]. Практикой также установлено, что причиной преждевременного выхода из строя футеровочных элементов зачастую является не износ, а разрушение вследствие деформации спиц и лопастей спирали. Эти деформации, как правило, обусловлены силовым воздействием перемещаемых на доизмельчение песков, поэтому изучение влияния этого воздействия на долговечность футеровки также заслуживает внимания.

Системный анализ основных факторов, влияющих на износ футеровки, показал, что наиболее значимым среди них является нагрузочный режим. Следовательно, зная, какое влияние будут оказывать конструктивные и технологические параметры классификатора на удельное давление сыпучей среды, можно косвенно судить о их влиянии на интенсивность износа рабочей поверхности футеровки в реальных условиях эксплуатации.



Анализ литературных данных [6] и визуальные наблюдения за характером перемещения абразивного материала позволили установить, что в спиральных классификаторах реализуется так называемый поступательный режим перемещения сыпучей массы в виде отдельных призм волочения в форме "цилиндрической подковки". Изучении реологии этой массы показало, что ее структура близка к идеально сыпучей. Эти

обстоятельства позволяют с высокой степенью достоверности исследовать взаимодействие рабочих органов спиральных классификаторов с призмой волочения методом предельного равновесия сыпучей среды, находящейся в области простейшего напряженного состояния [7].

Согласно схеме (рис. 1) давление сыпучей среды  $p_a$  линейно распределяется по высоте футеровки, достигая максимального значения у ее основания. На элемент футеровки также воздействуют осевые  $F_a$  и радиальные  $F_r$  нагрузки. После соответствующих преобразований с учетом формы призмы волочения, конструктивных особенностей классификаторов и футеровочных элементов, а также особенностей их взаимодействия с транспортируемым абразивным материалом были получены аналитические выражения для определения значений этих параметров:

$$p_a = \gamma \cdot x \cdot A;$$

$$F_a = \gamma \cdot A \cdot B \cdot K_4;$$

$$F_r = \gamma \cdot A \cdot B \cdot K_4;$$

где  $\gamma$  – насыпная плотность материала;  $x$  – текущая координата по оси абсцисс;  $A, B, C$  – коэффициенты:

$$A = \left[ \frac{\sin(\delta_{om} - \beta + \delta)}{\sin^2 \delta_{om}} \cdot \cos(\beta - \delta) \right] \cdot [1 - \sin(\beta - \delta) \cdot \sin(2\delta_{om} - \beta + \delta)];$$

$$B = \sin(\delta_{om} + \delta) + \operatorname{tg}(\beta - \delta) \cdot \cos(\delta_{om} + \delta);$$

$$C = \cos(\delta_{om} + \delta) - \operatorname{tg}(\beta - \delta) \cdot \sin(\delta_{om} + \delta);$$

$$K_4 = R^3 \cdot \left\{ \left[ \sqrt{2\Delta - \Delta^2} \cdot (\Delta^2 - 2\Delta + 3) / 3 \right] - \left[ (1 - \Delta) \arcsin \sqrt{2\Delta - \Delta^2} \right] \right\},$$

где  $\beta$  – угол естественного откоса сыпучего материала в движении;  $\delta_\phi$  – угол наклона рабочей поверхности футеровки к горизонту;  $\delta$  – угол наклона спирали классификатора к горизонту;  $\Delta$  – безразмерный параметр, определяемый отношением  $b/R$  ( $b$  – высота основания призмы волочения;  $R$  – радиус спирали).

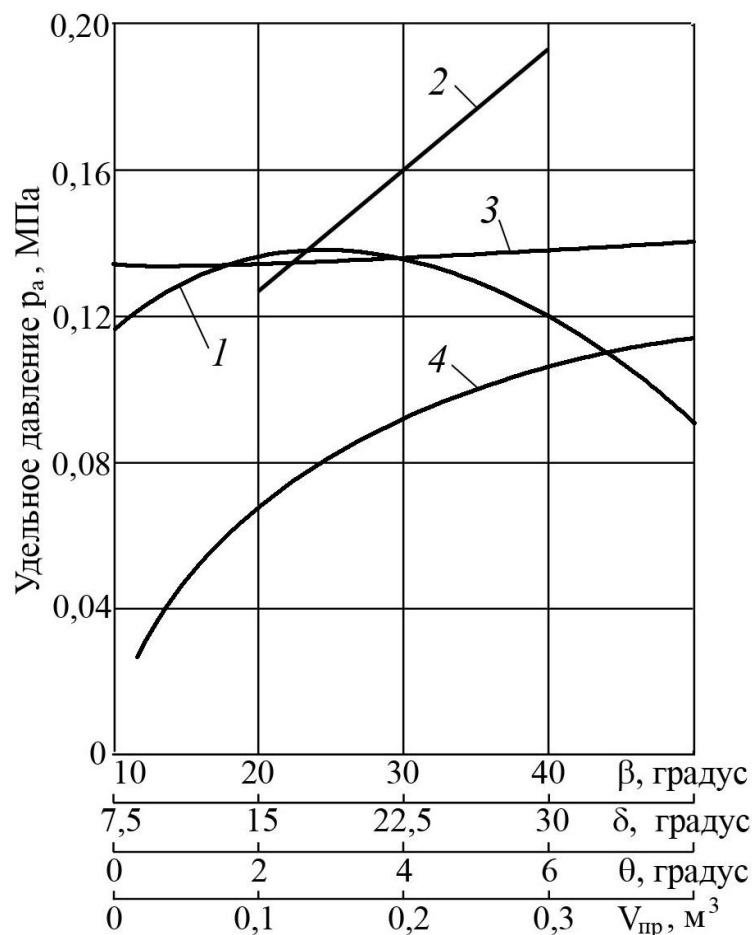
В этих выражениях угол  $\beta$  является комплексным показателем, отражающим фрикционные свойства перемещаемого материала, т. к. его значение зависит от величины коэффициента внутреннего трения материала и коэффициента трения материала о песчаную постель классификатора и рабочую поверхность футеровки.

Объем призмы волочения зависит от радиуса спирали  $R$  и безразмерного параметра  $\Delta$ .

В процессе транспортирования рудного материала значения угла  $\beta$  непрерывно изменяются. В нижнюю часть корыта классификатора измельченный материал поступает из шаровой мельницы в виде пульпы и его частицы находятся во взвешенном состоянии. В этих условиях внутренне трение практически отсутствует и угол  $\beta$  имеет значения, близкие к углу наклона спирали к горизонту ( $\beta = \delta$ ). По мере перемещения материала вдоль оси корыта и выхода из-под зеркала пульпы происходит его обезвоживание, что приводит к возрастанию сил трения и соответственно угла  $\beta$ , который достигает максимального значения на участке сброса материала в песковый желоб.

Значения этого угла также зависят от высоты основания призмы волочения  $b$  и ее объема  $V_{np}$ . В результате проведенного анализа (а. с. 1722585) с учетом рекомендаций [8] была установлена связь между величиной угла  $\beta$  и безразмерным параметром  $\Delta$ . Исследования показали, что при минимальном угле наклона спирали к горизонту, составляющем  $15^\circ$ , и высоте ленты спирали, равной половине ее радиуса, реальный диапазон изменения значений параметров  $b$  и  $\beta$  заключен в пределах от  $0,3$  до  $0,5R$  и от  $15$  до  $43,1^\circ$  соответственно.

При вращении спирали происходит постепенное увеличение глубины погружения элементов футеровки в абразивную массу и рост нормального давления. Наибольшего значения оно достигает в нижней точке спирали при глубине погружения равной  $b$  (рис. 1). Очевидно, что в этой точке и интенсивность износа футеровки будет максимальной. В этой связи представляет интерес исследование закономерностей изменения удельного давления именно в данной точке.



**Рис. 2. Зависимость давления сыпучей среды от углов  $\beta$  (1),  $\delta$  (2),  $\theta$  (3) и объема призмы волочения  $V_{пр}$ (4)**

На рис. 2 показаны результаты расчета  $p_a$  (кривая 1) для классификатора типа КС-30 в вышеуказанном диапазоне значений  $\beta$ , выполненные при граничных условиях:  $\delta = 15^\circ$ ,  $\delta_\phi = 75^\circ$ , базовая плотность материала  $\gamma = 2,7 \text{ т/м}^3$ . Аналогичные зависимости были получены и для классификаторов других типов.

Как следует из графика, максимального значения нормальное давление достигает при  $\beta \approx 25^\circ$ . Полученный результат объясняет причину повышенного износа футеровки на участке ее выхода из-под зеркала пульпы (5...6 виток спирали).

При дальнейшем увеличении угла  $\beta$  наблюдается снижение давления и износ должен уменьшиться. Однако эти результаты находятся в определенном противоречии с данными практики, согласно которым, в отдельных случаях, износ футеровки в верхней части спирали, наоборот, увеличивается. Возможная причина этого явления может быть связана с ростом коэффициентом трения транспортируемых песков о рабочую поверхность футеровки.

Таким образом, при перемещении призмы волочения в верхней части спирали одновременно протекают два конкурирующих процесса, обусловленных постоянным увеличением степени обезвоживания песков –

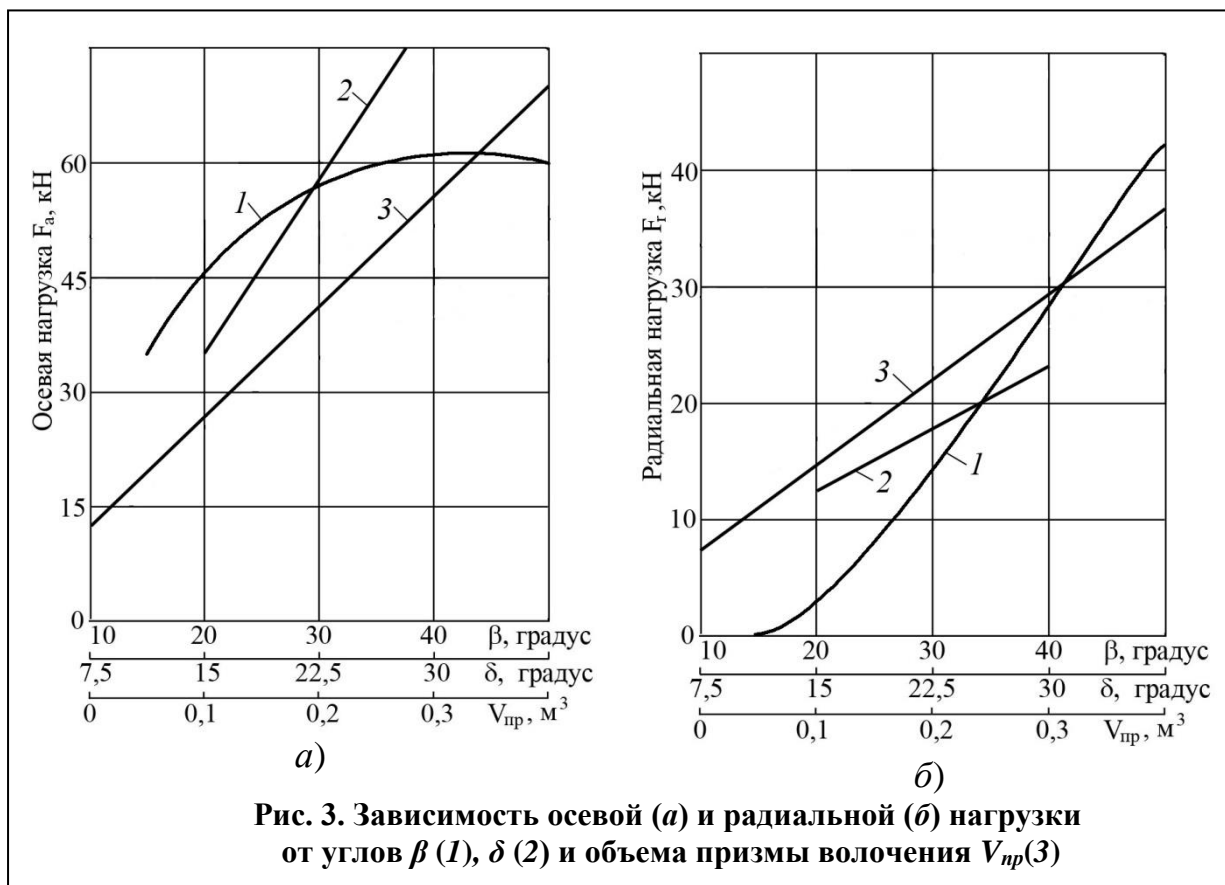
снижение удельного давления и повышение коэффициента трения. В зависимости от того, какой из этих процессов является преобладающим, может наблюдаться повышение или снижение износа футеровки.

Прямая 2 на рис. 2 отражает влияние угла наклона спирали к горизонту при граничных условиях:  $\delta_{\phi} = 90^{\circ} - \delta$  и  $\beta = \delta$ . Следует отметить, что для стандартных классификаторов  $\delta = 15...18^{\circ}$ . Однако в промышленных условиях, исходя из необходимости сопряжения классификаторов со смежным оборудованием (например, шаровыми мельницами) или иных соображений, этот угол может принимать и другие значения, как правило, в сторону увеличения. Как следует из графика этот параметр оказывает наиболее значительное влияние на абсолютную величину нагрузки. При этом в диапазоне углов  $\delta = 15...30^{\circ}$  давление в среднем возрастает на 30 %, но, в связи с нелинейным характером зависимости интенсивности изнашивания полимеров от нагрузки [10], это может привести к резкому возрастанию износа футеровки.

Кривая 3 на рис. 2 отражает влияние угла наклона рабочей поверхности футеровки к плоскости ленты спирали при значениях  $\beta = \delta = 15^{\circ}$ . Как следует из графика, в диапазоне углов  $\theta = 0...8^{\circ}$  этот параметр, вопреки ожиданиям, практически не оказывает влияния на давление сыпучей среды. Однако положительное воздействие наклонного расположения рабочей поверхности футеровки (рис. 2) заключается в другом. Во-первых, при этом повышается изгибная жесткость консольно-выступающего участка элемента футеровки, что весьма важно для низкомодульных материалов (резины). Во-вторых, при таком расположении отвала сыпучий материал находится в области простейшего напряженного состояния, что гарантирует стабильность и минимальную величину давления этого материала на поверхность футеровки [8].

Кривая 4 показывает влияние объема призмы волочения на давление сыпучей среды при граничных условиях:  $\delta = 15^{\circ}$ ,  $\delta_{\phi} = 75^{\circ}$ ,  $\beta = 43,1^{\circ}$ . Во всем диапазоне  $V_{np}$  наблюдается нелинейный рост давления, что на практике приводит к значительному увеличению износа футеровки. Такое положение характерно для классификаторов эксплуатируемых не в паспортном режиме (например, при повышенной производительности по пескам) и классификаторов, используемых для обезвоживания зернистого материала. Причем эта кривая является общей для всех типов классификаторов.

На рис. 3, а, б приведены кривые, отражающие зависимость осевой и радиальной нагрузки от углов  $\beta$ ,  $\delta$  и объема призмы волочения  $V_{np}$  в вышеуказанном диапазоне значений переменных параметров и граничных условий.



**Рис. 3. Зависимость осевой (а) и радиальной (б) нагрузки от углов  $\beta$  (1),  $\delta$  (2) и объема призмы волочения  $V_{пр}$  (3)**

Из анализа кривых 1 следует, что по мере обезвоживания транспортируемого материала и увеличения угла  $\beta$  возрастают как осевая, так и радиальная нагрузка, достигая максимума на участке сброса песков в приемный желоб. К значительному росту этих усилий приводит также и увеличение угла наклона спирали к горизонту (кривая 2). Зависимости осевой и радиальной нагрузки от объема призмы волочения являются строго линейными (3), причем эти прямые являются общими для всех типов классификаторов.

Рассмотренные усилия оказывают косвенное влияние на износостойкость футеровки. В частности осевая нагрузка вызывает изгибные деформации в ленте спирали, что при определенных обстоятельствах приводит к ее разрушению, а, следовательно, к преждевременному выходу из строя элементов футеровки. Для того, чтобы повысить изгибную жесткость в на некоторых предприятиях между лопастями устанавливают распорные стойки из стандартных профилей. Поэтому при эксплуатации классификаторов необходимо постоянно контролировать ход технологического процесса и не допускать чрезмерной перегрузки, поскольку это может привести к катастрофическому износу футеровки. Радиальное усилие, наоборот, оказывает положительное влияние на долговечность футеровки, т. к. согласно схеме на рис. 1 оно

направлено снизу вверх, что приводит к выглублению спирали и снижению давления на торцевой поверхности футеровки.

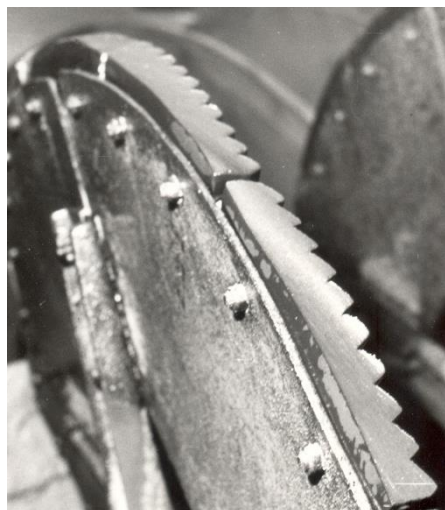


**Рис. 4. Характер износа футеровочных элементов с гладкой рабочей поверхностью**

Проведенный анализ показывает, что конструктивные и технологические параметры спиральных классификаторов оказывают значительное влияние на износостойкость футеровки. При этом наиболее значимыми являются угол наклона спирали к горизонту и объем призмы волочения. Эти выводы подтверждаются результатами опытно-промышленных испытаний резиновой футеровки с гладкой рабочей поверхностью, показанной на рис. 4. Сектор на рис. 4, *а* эксплуатировался в условиях ОАО Урупский ГОК, а на рис. 4 *б* – фабрики № 3 АК "АЛРОСА". Физико-механические характеристики обогащаемых материалов на этих предприятиях были примерно одинаковы. Отличие заключалось в угле наклона спирали к горизонту – 15 и 23° соответственно, и производительности классификаторов по пескам, которая на втором предприятии была в 1,5...2 раза выше. Вследствие этого первый сектор изнашивался только по торцевой поверхности и срок его службы составил около 12 тыс. часов, а второй – преимущественно по рабочей поверхности и срок его службы составил 3,3 тыс. часов, т. е. примерно в три раза меньше.

В этой связи для классификаторов, эксплуатируемых в нормальном (паспортном) режиме, оправдано применение обычной футеровки с гладкой рабочей поверхностью. Что касается второго случая, то здесь рекомендуется применять ребристую футеровку, рассмотренную в сообщении [1]. Конструктивные усовершенствования позволили эффективно защитить от износа рабочую поверхность этой футеровки и реализовать износ по торцевой поверхности (рис. 5). Долговечность этой футеровки в самых жестких условиях эксплуатации составила не менее 12 тыс. часов, что соизмеримо со сроком службы основных элементов спирали (лопастей и спиц).





**Рис. 5. Характер износа ребристой футеровки**

В таблице приведены номенклатура резиновой футеровки, разработанной на кафедре механики и основ конструирования СКФУ. Серийное производство этой футеровки налажено в ОАО "Черкесский завод РТИ".

Тип классификатора	Обозначение сектора футеровки	Исполнение сектора футеровки	Масса сектора футеровки, кг	Присоединительный размер*, мм	Средний срок службы футеровки, мес.
КС(Н)-12	М449-33	гладкая	0,9	105	15...18
	Г2-М449-33	ребристая	1,2	105	24...36
КС(Н)-15	М449-33	гладкая	0,9	105	15...18
	Г2-М449-33	ребристая	1,2	105	24...36
КС(Н)-20	М-449-32	гладкая	2,4	194	15...18
	Г4-М449-32	ребристая	4,0	194	24...36
КС(Н)-24	М-449-32	гладкая	2,4	194	15...18
	Г4-М449-32	ребристая	4,0	194	24...36
КС(Н)-30	М-449-34	гладкая	3,5	250	15...18
	Г2-М449-34	ребристая	4,3	250	24...36
КС(Н)-4,8	М449-35	гладкая	0,63	233	36...48
КС(Н)-7,5	М-449-36	гладкая	1,2	410	36...48

\* Сектора резиновой футеровки полностью взаимозаменяемы с секторами металлической футеровки по габаритам и присоединительным размерам.

## Список литературы

1. **Сербин В.М.** К вопросу повышения долговечности рабочих органов спиральных классификаторов. // Горное оборудование и электромеханика. № 8. 2011, С. 23-29.
2. **Сербин В.М.** Повышение износостойкости рабочих органов спиральных классификаторов малых типоразмеров // Горное оборудование и электромеханика. № 6. 2012, С. 45-48.
3. **Сербин В.М.** Разработка износостойкой эластомерной композиции для футеровки спиральных классификаторов // Научный симпозиум "Неделя горняка 2013". Сборник научных трудов семинара "Современные технологии в машиностроении". – М.: МГГУ, 2013. С. 249-258.
4. **Пенкин Н.С., Копченков В.Г., Сербин В.М., Пенкин А.С.** Гуммированные детали машин / под ред. д.т.н., проф. Н. С. Пенкина. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2013. – 245 с.
5. **Повышение** износостойкости горно-обогачительного оборудования / Н. С. Пенкин, Е. П. Капралов, П. В. Маляров и др. / под ред. д.т.н., проф. Н. С. Пенкина. – М.: Недра, 1992. – 265 с.
6. **Григорьев А. М.** Винтовые конвейеры. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
7. **Соколовский В. В.** Статика сыпучей среды. – М.: Гостехтеориздат. 1960. – 240 с.
8. **ГОСТ 28121–89.** Классификаторы спиральные. Типы, основные параметры, размеры и технические требования. – Введ. 01.01.90. – Госстандарт СССР : Изд-во стандартов, 1989. 11 с.