



## Оценка прочности секции става шахтного скребкового конвейера

А.Д. Лазарев, И.А. Жуков ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
✉ [timmok@yandex.ru](mailto:timmok@yandex.ru)

**Резюме:** В статье представлен методический подход к оценке прочности секции става шахтного скребкового конвейера, эксплуатационное нагружение которой носит комплексный характер, формируя тем самым сложное напряжённо-деформированное состояние. В существующей инженерной практике прочность секции оценивается по отдельным конструктивным элементам, что не позволяет учесть совместное действие нагрузок и выявить критические зоны на стадии проектирования. Установлено, что прямое применение метода конечных элементов к полной модели секции сопряжено со значительными вычислительными затратами, а моделирование сварных соединений как монолитного тела вносит дополнительную систематическую погрешность в расчете напряжений. В качестве решения предложено применение метода суперэлементов, основанного на декомпозиции конструкции на подсистемы, что позволяет снизить порядок итоговой системы уравнений при сохранении точности исходной дискретизации. На примере подсистемы направляющей рейки установлена минимально достаточная расчётная схема и идентифицирован конструктивный элемент, лимитирующий несущую способность узла.

**Ключевые слова:** добыча угля, шахтный скребковый конвейер, секция става конвейера, оценка прочности, конечно-элементное моделирование, метод суперэлементов

**Для цитирования:** Лазарев А.Д., Жуков И.А. Оценка прочности секции става шахтного скребкового конвейера. *Горная промышленность*. 2026;(4S):113–119. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-113-119>

## Assessment of the flight section strength of an armoured face conveyor

A.D. Lazarev, I.A. Zhukov ✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation  
✉ [timmok@yandex.ru](mailto:timmok@yandex.ru)

**Abstract:** The article sets the task of assessing the strength of a flight section of an armoured face conveyor, which operational loading has a complex character, thereby forming a complex stress-strain state. In the existing engineering practice, the strength of the section is assessed by individual structural elements, which does not allow taking into account the combined effect of stresses and identifying critical areas at the design stage. It is established that direct application of the finite element method to a complete model of the section involves significant computational costs, and modeling welded joints as a solid body introduces an additional systematic error in the stress calculation. Application of the superelement method is proposed as a solution, based on decomposition of the structure into subsystems, which allows reducing the order of the final system of equations while maintaining the accuracy of the initial discretization. A minimally sufficient design scheme has been established and the structural element limiting the bearing capacity of the node has been identified using the guide rail subsystem as an example.

**Keywords:** coal mining, armoured face conveyor, conveyor flight section, strength assessment, finite element analysis, superelement method

**For citation:** Lazarev A.D., Zhukov I.A. Assessment of the flight section strength of an armoured face conveyor. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):113–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-113-119>

## Введение

Развитие угольной промышленности [1–3], естественно, предполагает применение технологических инноваций [4–6] и сокращение материальных и энергетических затрат на этапе проектирования [7; 8]. Подземный (шахтный) способ добычи угля является безальтернативным для освоения глубоких пластов. Основным оборудованием при подземном способе добычи угля является очистной механизированный комплекс, включающий комбайн, секции крепи и транспортные системы [9], включающие в себя чаще всего скребковый конвейер.

В процессе эксплуатации секция става конвейера подвергается одновременно действующим динамическим нагрузкам от горной массы [10; 11], статическим нагрузкам от опор комбайна, тяговых цепей, скребков и механизма подачи [12], что обуславливает сложное напряжённо-деформированное состояние, определяемое взаимным влиянием отдельных элементов конструкции. Следствием комплексного нагружения секции является преждевременный выход конструктивных элементов из строя [13; 14]. В существующей инженерной практике оценка прочности секции става конвейера производится преимущественно по отдельным конструктивным элементам – определяют габаритные параметры боковин, прочность участка направляющей рейки, отдельных сварных соединений и т.д. Такой подход не позволяет учесть комплексный характер нагружения в условиях реальной эксплуатации и не обеспечивает определение участков конструкции, подлежащих оптимизации на стадии проектирования. В таком случае задача обеспечения прочности секции решается лишь путем замены опасного узла в целом на более массивное его исполнение.

Анализ прочности сложных конструкций, к которым относится и секция скребкового конвейера, ведётся, как правило, методом конечных элементов (МКЭ) [15–17], учитывающим геометрию модели, граничные условия и одновременное действие нагрузок различной природы. Вместе с тем прямое применение МКЭ к полной модели требует локального уменьшения размеров конечных элементов (КЭ) в зонах резкого изменения сечений [18; 19], в сварных соединениях и местах приложения нагрузок, что определяется требуемой точностью решения.

Настоящая работа посвящена развитию методики прочностного анализа секции става забойного скребкового конвейера, обеспечивающей учёт комплексного характера эксплуатационного нагружения в условиях приемлемых вычислительных затрат.

## Материалы и методы

Объектом исследования является типовая секция става скребкового конвейера (рис. 1) – сварная металлоконструкция, состоящая из двух боковин 1 и 2, соединённых верхним 3 и нижним 4 листами желоба. В верхней части образуется рабочая ветвь перемещения угольной массы скребками, в нижней – холостая ветвь возврата цепи. На одну из боковин кронштейнами и соединительными пальцами крепится зубчатая направляющая рейка 5, взаимодействующая с колесом механизма подачи комбайна.

В процессе эксплуатации секция воспринимает совокупность нагрузок (см. рис. 1, б): на верхний лист действуют силы  $F_1$ ,  $F_2$  от скребка и цепи, носящие переменный во времени характер [20; 21], и сила  $F_6$  от транспортируемой угольной массы; нижний лист воспринимает  $F_1$ ,  $F_2$  от обратной ветви цепи и скребков; сила  $F_3$  от опоры комбайна пе-

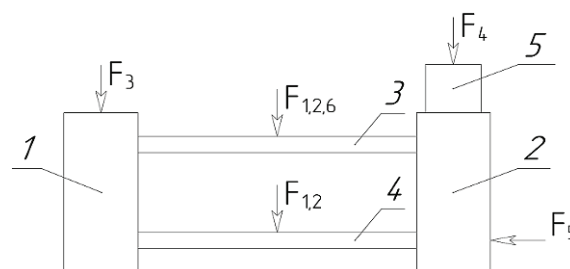


Рис. 1

Секция става:  
а – общий вид;  
б – расчетная схема:  
1, 2 – боковины,  
3 – верхний лист желоба,  
4 – нижний лист желоба,  
5 – зубчатая направляющая рейка

Fig. 1

Flight section:  
a – general view;  
б – calculation scheme:  
1, 2 – side plates,  
3 – top plate of the trough,  
4 – bottom plate of the trough,  
5 – serrated guide rail

редаётся локально на боковину; сила  $F_4$  действует на рейку нормально к профилю зуба при взаимодействии с колесом механизма подачи [22]; сила  $F_5$  от сдвижки крепи действует на боковину вне рабочего цикла комбайна. Численные значения указанных нагрузок, действующих на секцию в эксплуатационных условиях, определяются известными соотношениями, приведенными в работе [23].

Анализ напряженно-деформированного состояния секции с учетом всех эксплуатационных нагрузок может осуществляться с применением МКЭ при условии создания полномасштабной модели. Однако в таком случае получение решения с достаточной для практики степенью точности, естественно, сопряжено с высокими затратами времени и средств вычислительного эксперимента, т.к. при возрастании количества конечных элементов, пропорционального размеру модели, время ее подготовки и расчета могут занимать от нескольких часов до нескольких суток, что в современных требованиях к срокам внедрения инновационных технических решений становится неприемлемо. Покажем это на примере секции, приведенной на рис. 1.

Моделирование выполнялось в программном комплексе T-FLEX. Для дискретизации объёмных тел использовались КЭ в виде 10-узловых тетраэдров. Вычислительный эксперимент проведен серией из 9 расчётов полной модели секции става при варьировании абсолютного размера КЭ сетки в диапазоне от 40 до 9 мм. Расчёты выполнены на персональном компьютере с конфигурацией: процессор AMD Ryzen 5 5600H, оперативная память 16 Гб, видеоадаптер NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU.

Для каждого варианта размера сетки  $h$  фиксировались (табл. 1) число КЭ, погрешность  $\delta$  определения максималь-

ных эквивалентных напряжений и полное время расчёта  $t$ , включающее как непосредственное решение системы уравнений МКЭ, так и время автоматической генерации КЭ сетки. В качестве точного и корректного решения, принятого за аналог при оценке погрешности, были приняты результаты оценки напряженно-деформированного состояния узла крепления кронштейна рейки с боковиной секции, полученные с применением законов механики деформируемого твердого тела, а именно условий равновесия и совместности деформаций.

Анализ табл. 1 показывает, что зависимость погрешности  $\delta$  от размера  $h$  имеет монотонный характер с замедляющимся убыванием в области малых  $h$ , что объясняется приближением численного решения к точному при дальнейшем увеличении количества КЭ сетки. По полученным экспериментальным данным (рис. 2) зависимость погрешности  $\delta$  от размера сетки  $h$  аппроксимирована логарифмической:

$$\delta(h) = 10,963 \cdot \ln(h) - 16,785, \quad (1)$$

а зависимость времени  $t$  от размера сетки  $h$  (при  $h \leq 15$ ) – степенной:

$$t(h) = 3,19 \cdot 10^{17} \cdot h^{-14,66}. \quad (2)$$

При размере сетки от 40 до 10 мм время расчёта возрастает, но при  $h = 9$  мм время достигает 3260 с, что почти в 5 раз превышает значение при  $h = 10$  мм. Переход через  $h \approx 10$  мм отражает экспоненциальный характер роста и

Таблица 1  
Результаты расчёта полной модели секции става скребкового конвейера

Table 1  
Results of a complete model computation for a flight section of an armoured face conveyor

| № | Размер сетки $h$ , мм | Количество КЭ | Погрешность $\delta$ , % | Время расчёта $t$ , с |
|---|-----------------------|---------------|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 40                    | 133 952       | 23                       | 22                    |
| 2 | 35                    | 164 541       | 22                       | 24                    |
| 3 | 30                    | 208 364       | 20                       | 28                    |
| 4 | 25                    | 288 006       | 20                       | 42                    |
| 5 | 20                    | 453 373       | 15                       | 66                    |
| 6 | 15                    | 873 020       | 14,5                     | 136                   |
| 7 | 10                    | 2 625 991     | 10                       | 680                   |
| 8 | 9,5                   | 2 945 028     | 8                        | 1490                  |
| 9 | 9                     | 3 469 199     | 6                        | 3260                  |

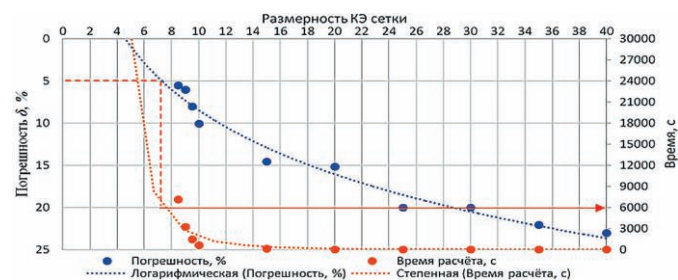


Рис. 2  
Результаты вычислительного эксперимента расчёта полной модели секции става скребкового конвейера

Fig. 2  
The results of a computational experiment for a complete model of an armoured face conveyor flight section

определяет границу практической применимости прямого расчёта полной модели на используемой вычислительной системе. Из рис. 2 очевидно, что инженерная погрешность 5%, принятая в качестве базового критерия точности расчётов на прочность, для полной модели секции достигается при размере сетки порядка 7 мм. При этом время расчёта, оцениваемое по зависимости (2), составит около 6000 с.

Следует отметить, что приведённая оценка прочности секции относится исключительно к погрешности численного решения и не учитывает погрешность, обусловленную упрощениями модели, в которой, например, не учтены свойства околошовной зоны сварных соединений. Для оценки дополнительной погрешности проведён сопоставительный расчёт тестового сварного узла (рис. 3), в котором параметры расчёта (геометрия, тип контактных связей, граничные условия, нагружение, сетка) приняты идентичными; различие состоит только в том, что в первом случае (рис. 3, а) свойства околошовной зоны не учитывались, а во втором случае (рис. 3, б) они задавались дискретно путем дискретного деления модели.

Результаты расчёта двух вариантов моделей (см. рис. 3) свидетельствуют о том, что расхождение в значениях максимальных эквивалентных напряжений составляет около 4%. То есть моделирование сварного узла как монолитного тела вносит систематическую погрешность по напряжениям, сопоставимую с инженерной. В критических узлах возможно суммирование погрешностей численного расчёта и условий задания свойств сварных узлов, что повышает требования к сходимости результатов вплоть до 1% и, соответственно, кратно увеличивает время расчёта [24–27].

Из приведённых данных следует: чтобы корректно учесть напряжённое состояние в околошовных зонах [28; 29], прямой КЭ расчёт всей секции потребует чрезмерных вычислительных или временных ресурсов. Один из возможных путей – переход к методу суперэлементов (МСЭ). Конструкцию делят на подсистемы, а внутренние степени свободы каждой подсистемы устраняют статической конденсацией. Узлы подсистемы при этом распределяют по двум множествам: внутренние, замкнутые на саму подсистему, и граничные, по которым подсистемы стыкуются между собой. После конденсации подсистема входит в общую задачу как один суперэлемент – с редуцированной матрицей жёсткости [30] и приведёнными к границе нагрузками. Гло-

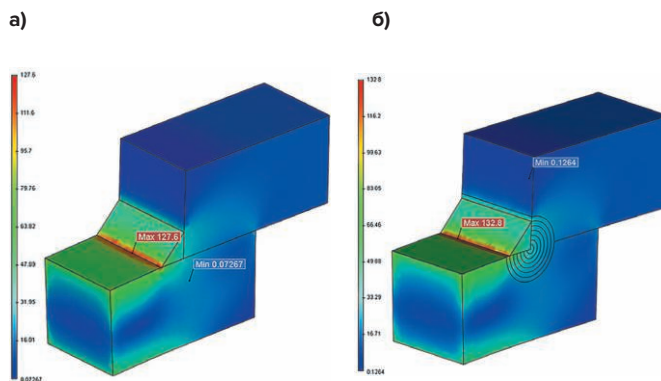


Рис. 3  
Анализ сварного соединения: а – без учета околошовной зоны; б – с учетом околошовной зоны

Fig 3  
Analysis of a welded joint: а – without account of the weld adjacent zone; б – with account the weld adjacent zone

бальная система уравнений строится только на граничных неизвестных [31; 32], её порядок резко падает, а исходная точность внутри каждой подсистемы сохраняется.

Применительно к секции става скребкового конвейера такая декомпозиция выполняется как минимум по двум направлениям: выделяют подсистему направляющей рейки и подсистему желоба. Первая включает зубчатую рейку, кронштейны и пальцы, через которые рейка крепится к боковине секции. Нагрузки на этот узел из числа самых высоких по конструкции – отсюда и его повторяющиеся отказы [33–35]. Вторая подсистема – желоб – несёт основную весовую часть секции и формирует рабочую поверхность, по которой скребки перемещают угольную массу.

## Результаты

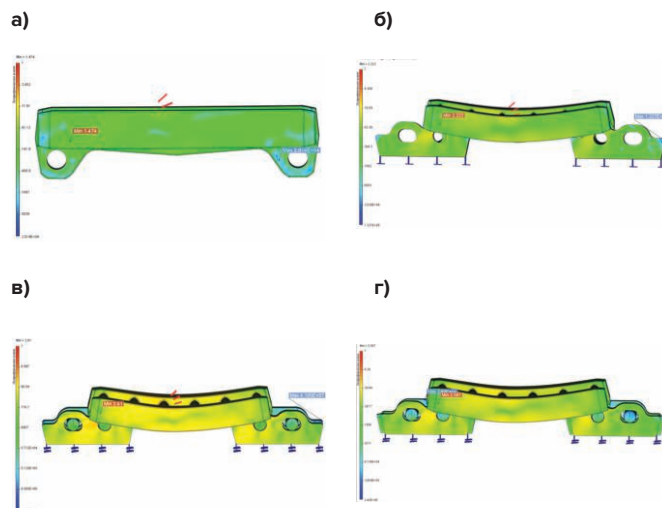
Эффективность МСЭ проверяли на одной из выделенных подсистем – направляющей рейке. Прочностной расчёт повторяли для четырёх конфигураций подсистемы: каждая следующая отличалась от предыдущей одним дополнительным элементом конструкции. Это дало возможность увидеть вклад каждого элемента отдельно и зафиксировать ту конфигурацию, на которой картина напряжённо-деформированного состояния узла перестаёт существенно меняться.

Нагрузку на зуб рейки по нормали к его профилю определяли расчётным путём – через мощность и тяговое усилие очистного комбайна по его паспортным характеристикам. Граничные условия для всех конфигураций идентичны. На нижней поверхности каждого кронштейна задано жёсткое закрепление, моделирующее его соединение с боковиной. Соединительные пальцы (с конфигурации 3) зафиксированы по цилиндрической посадочной поверхности с запретом радиального перемещения, а жёсткое закрепление торца моделирует их удержание в боковине. Между пальцами и сопрягаемыми деталями – направляющей рейкой и кронштейнами – задано контактное взаимодействие типа «касание». Размер КЭ сетки принят 5 мм для зон общей дискретизации и 1 мм в зонах контактного взаимодействия зубьев рейки с пальцами. Физико-механические свойства материалов элементов подсистемы заданы в соответствии с рабочей конструкторской документацией. Конфигурация подсистемы 1 включает только направляющую рейку, конфигурация 2 – рейку и кронштейны, конфигурация 3 – рейку, кронштейны и соединительные пальцы, конфигурация 4 – рейку, кронштейны, пальцы и

**Таблица 2**  
Результаты расчёта  
конфигураций подсистемы  
направляющей рейки

| № | Состав подсистемы                                      | Количество<br>КЭ | КЗП<br>(min) | Время<br>расчёта, с |
|---|--------------------------------------------------------|------------------|--------------|---------------------|
| 1 | Направляющая<br>рейка                                  | 691 879          | 1,474        | 45                  |
| 2 | Рейка +<br>кронштейны                                  | 1 106 335        | 2,222        | 77                  |
| 3 | Рейка +<br>кронштейны +<br>пальцы                      | 1 396 066        | 2,610        | 130                 |
| 4 | Рейка +<br>кронштейны +<br>пальцы + рёбра<br>жёсткости | 1 411 325        | 2,587        | 141                 |

**Table 2**  
Results of calculating  
configurations of the rail  
guide subsystem



**Рис. 4**  
Анализ коэффициента запаса  
прочности подсистемы  
с конфигурациями:  
а – 1 (только направляющая  
рейка); б – 2 (направляющая  
рейка и кронштейны);  
в – 3 (направляющая рейка,  
кронштейны и соединительные  
пальцы); г – 4 (направляющая  
рейка, кронштейны,  
соединительные пальцы и  
рёбра жёсткости)

**Fig. 4**  
Analysis of safety factor for  
the subsystem with the  
following configurations:  
a – 1 (guide rail only);  
b – 2 (guide rail and brackets);  
c – 3 (guide rail, brackets and  
connecting pins);  
d – 4 (guide rail, brackets,  
connecting pins and rib  
stiffeners)

рёбра жёсткости. Критерием минимально достаточной конфигурации подсистемы принята сходимость коэффициента запаса прочности (КЗП): относительное изменение значения min КЗП при переходе от одной конфигурации к следующей не должно превышать 1%. Результаты расчёта приведены в табл. 2, поля распределения КЗП – на рис. 4.

Конфигурация 1 (изолированная направляющая рейка, 691879 КЭ) даёт min КЗП = 1,474. Низкое значение коэффициента запаса обусловлено тем, что в отсутствие кронштейнов и пальцев вся приложенная к зубу нагрузка воспринимается рейкой без перераспределения на смежные конструктивные элементы. Минимум КЗП локализован на нижней поверхности рейки в зоне между опорными участками и соответствует характеру изгиба балочного типа.

При добавлении кронштейнов (конфигурация 2, 1106335 КЭ) min КЗП возрастает до 2,222. Относительное изменение составляет +50,7% к значению конфигурации 1, что отражает принципиальное влияние кронштейнов на перераспределение нагрузки в подсистеме: часть изгибающего момента, передаваемого с рейки, воспринимается кронштейнами, в результате чего напряжённое состояние самой рейки разгружается. Зона минимума КЗП при этом смещается в верхнюю часть рейки, в область контакта с кронштейном.

Введение в состав подсистемы соединительных пальцев (конфигурация 3, 1396066 КЭ) повышает min КЗП до 2,610. Относительное изменение составляет +17,5% к значению конфигурации 2. Пальцы являются непосредственным механическим связующим звеном между рейкой и кронштейнами и обеспечивают передачу тягового усилия через контактное взаимодействие; их введение в расчётную схему заменяет упрощённое представление контакта «рейка – кронштейн» на более полную физическую модель с учё-



том контактных условий по цилиндрическим посадочным поверхностям пальцев.

При добавлении рёбер жёсткости (конфигурация 4, 1411325 КЭ) min КЗП составляет 2,587. Относительное изменение по модулю не превышает 0,9%, что удовлетворяет принятому критерию сходимости. Малая величина изменения свидетельствует о незначительном вкладе рёбер жёсткости в напряжённое состояние подсистемы при принятой схеме нагружения, что согласуется с их функциональным назначением – повышение общей жёсткости боковины секции, а не разгрузка узла крепления направляющей рейки.

В качестве минимально достаточной по критерию сходимости признаётся конфигурация 3 (min КЗП = 2,610), для которой переход к более полной конфигурации 4 даёт изменение КЗП в пределах допустимого порога. Полученный результат согласуется с наблюдаемой в эксплуатации картиной разрушений: типичные поломки данного узла локализуются в зоне проушин рейки и кронштейнов, контактирующих с пальцем.

Таким образом, предложенная декомпозиция и расчётная схема корректно идентифицируют конструктивный элемент, лимитирующий несущую способность подсистемы направляющей рейки секции става скребкового конвейера.

## Заключение

Таким образом, предложенный подход к анализу прочностных характеристик секции става шахтного скребкового конвейера, основанный на применении метода суперэлементов, обеспечивает упрощение расчетной модели путем ее декомпозиции, что, естественно, приводит к существенному сокращению времени проведения вычислительных экспериментов. Достоверность полученных результатов на примере оценки прочности узла направляющей рейки секции подтверждается данными о выходе из строя секции в промышленных условиях эксплуатации.

Практическое применение изложенного методического подхода позволяет не только сократить время выполнения инженерного проекта в целом, но дает возможность быстрой итерационной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции при оптимизации принимаемых решений, обусловленных требованием к снижению металлоемкости элементов скребкового конвейера, что несомненно положительно сказывается на рабочих условиях добычи угля очистным комплексом.

## Список литературы / References

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *Записки Горного института*. 2023;259:95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>  
Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
2. Казанин О.И. Перспективные направления развития технологий подземной угледобычи в РФ. *Горный журнал*. 2023;(9):4–11. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.09.01>  
Kazanin O.I. Promising technology trends in underground coal mining in Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(9):4–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.09.01>
3. Liu Q., Qiu Z., Li M., Shang J., Niu W. Evaluation and empirical research on green mine construction in coal industry based on the AHP-SPA model. *Resources Policy*. 2023;82:103503. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103503>
4. Maksarov V.V., KufaeV V.G. Magnetic Abrasive Finishing of Workpieces for Anti-friction Bronze Slide Bearing Shells. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2026;39(1):26–33. <https://doi.org/10.5829/IJE.2026.39.01A.03>
5. Zhang L., Ponomarenko T. Directions for sustainable development of China's coal industry in the post-epidemic era. *Sustainability*. 2023;15(8):6518. <https://doi.org/10.3390/su15086518>
6. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2020;26(1):60–69. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.05>
7. Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Технологические требования к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):85–99. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2025\\_123\\_0\\_85](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_85)  
Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):85–99. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2025\\_123\\_0\\_85](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_85)
8. Хамидов О.У., Шибанов Д.А. Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):152–167. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2025\\_123\\_0\\_152](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_152)  
Khamidov O.U., ShibanoV D.A. Regulated maintenance and repair of quarry excavators considering real-world conditions and operating modes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):152–167. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2025\\_123\\_0\\_152](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_152)



9. Габов В.В., Суан Н.В., Задков Д.А., Тхо Ч.Д. Увеличение содержания крупных фракций в добываемой массе угля комбайном с использованием парных срезов. *Записки Горного института*. 2022;257:764–770. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.66>  
Gabov V.V., Xuan N.V., Zadkov D.A., Tho T.D. Increasing the content of coarse fractions in the mined coal mass by a combine using paired cuts. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:764–770. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.66>
10. Зубов В.П., Голубев Д.Д. Перспективы использования современных технологических решений при отработке пологих пластов угля с учетом опасности формирования очагов его самовозгорания. *Записки Горного института*. 2021;250:534–541. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.6>  
Zubov V.P., Golubev D.D. Prospects for the use of modern technological solutions in the flat-lying coal seams development, taking into account the danger of the formation of the places of its spontaneous combustion. *Journal of Mining Institute*. 2021;250:534–541. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.6>
11. Жуков И.А., Голиков Н.С., Мартюшев Н.В. Рационализация конструкции секции скребкового конвейера средствами автоматизированного метода анализа прочностных характеристик. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(1):142–150.  
Zhukov I. A., Golikov N. S., Martyshev N. V. Design rationalization of the scraper conveyor section by means of an automated method of strength characteristics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(1):142–150. (In Russ.).
12. Недашковская Е.С., Шешукова Е.И., Корогодина А.С., Мякотных А.А., Шибанов Д.А., Иванов С.Л. Структура системы технического обслуживания и ремонта горных машин. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2024;(25):155–162. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-155-162>  
Nedashkovskaya E.S., Sheshukova E.I., Korogodina A.S., Myakotnykh A.A., Shibyanov D.A., Ivanov S.L. Structure of the system of maintenance and repair of mining machines. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2024;(25):155–162. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-155-162>
13. Zhang P., Li B., Ma H., Xia R., Dong Y., Wang X. Fatigue life analysis of scraper conveyor chain ring under different chain speeds and loads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2026;240(1):509–521. <https://doi.org/10.1177/09544089241253057>
14. Jiang S., Ren W., Mao Q., Zeng Q., Yu P., Gao K., Wang L. Dynamic analysis of the scraper conveyor under abnormal operating conditions based on the vibration and speed characteristics. *Shock and Vibration*. 2021;2021:8887744. <https://doi.org/10.1155/2021/8887744>
15. Tian Z., Jing S., Zhao L., Liu W., Gao S. Numerical simulation on coal loading process of shearer drum based on discrete element method. *Energy Exploration & Exploitation*. 2021;39(6):1919–1938. <https://doi.org/10.1177/01445987211013536>
16. Yang L., Zhang H., Song Y., Chen W., Chen Y. Study on multibody contact load distribution characteristics of scraper conveying system of continuous miner. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2023;47(4):575–587. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2023-0017>
17. Великанов В.С., Гришин И.А., Акманова З.С., Лукашук О.А., Лукашук А.Д. Современные аспекты создания горнотранспортных машин в условиях цифровой трансформации горных предприятий. *Горная промышленность*. 2024;(5S):28–32. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-28-32>  
Velikanov V.S., Grishin I.A., Akmanova Z.S., Lukashuk O.A., Lukashuk A.D. Contemporary aspects of designing mining transport machines in the context of digital transformation of mining operations. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):28–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-28-32>
18. Linh N.K., Gabov V.V., Lykov Y.V., Urazbakhtin R.Y. Evaluating the efficiency of coal loading process by simulating the process of loading onto the face conveyor with a shearer with an additional share. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2021;34(7):1804–1809. <https://doi.org/10.5829/IJE.2021.34.07A.25>
19. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Недашковская Е.С. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 1). *Горная промышленность*. 2024;(3):143–148. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-143-148>  
Sheshukova E.I., Shibyanov D.A., Ivanov S.L., Nedashkovskaya E.S. Assessment of loads acting on the working attachment of a mine shovel (Part 1). *Russian Mining Industry*. 2024;(3):143–148. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-143-148>
20. Li S., Zhu Z., Lu H., Xue Y. Tension characteristics analysis of scraper chain of heavy-duty scraper conveyor with time-varying loads. *Shock and Vibration*. 2024;2024:5589346. <https://doi.org/10.1155/2024/5589346>
21. Hao J., Song Y., Liu H., Zhang P., Chen L., Zhang N. et al. The optimal design model for a new type of scraper and research on its material properties. *Lubricants*. 2023;11(4):171. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040171>
22. Ma D., Wan L., Zhang X., Zeng Q., Gao K. Meshing characteristics and failure analysis of shearer walking wheel considering torsional deformation. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(7):5771–5782. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.035>
23. Лазарев А.Д., Жуков И.А. Методические подходы к определению и оценке прочности решетчатого става забойного скребкового конвейера. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2025;(31):125–132. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-31-125-132>  
Lazarev A.D., Zhukov I.A. Methodological approaches to the determination and assessment of the strength of the grating block of a downhole scraper conveyor. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2025;(31):125–132. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-31-125-132>



24. Ma H., Wang X., Li B., Liu Z., Bi W., Wei X. Study on the mechanical effect and wear behaviour of middle trough of a scraper conveyor based on DEM-MBD. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2022;236(7):1363–1374. <https://doi.org/10.1177/13506501211059259>
25. Bärnkopf E., Kövesdi B., Dunai L. Investigation of stress concentration zones in FEM-based design of welded plated structures. *Buildings*. 2023;13(4):1057. <https://doi.org/10.3390/buildings13041057>
26. Arandjelovic M., Djordjevic B., Sedmak S., Radu D., Petrovic A., Dikic S., Sedmak A. Failure analysis of welded joint with multiple defects by extended Finite Element Method and Engineering Critical Analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2024;160:108176. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108176>
27. Yan R., Xin H., Yang F., El Bamby H., Veljkovic M., Mela K. A method for determining the constitutive model of the heat-affected zone using digital image correlation. *Construction and Building Materials*. 2022;342:127981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127981>
28. Molski K.L., Tarasiuk P., Glinka G. Stress concentration at cruciform welded joints under axial and bending loading modes. *Welding in the World*. 2020;64(11):1867–1876. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00966-4>
29. Ghimire A., Wald F., Vild M., Kabeláč J. Numerical design calculation of the high-strength steel welds. *Engineering Structures*. 2024;300:117201. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117201>
30. Вороненко Е.Я., Палий О.М., Сочинский С.В. *Метод редуцированных элементов для расчета конструкций*. Ленинград: Судостроение; 1990. 220 с.
31. Lee D., Chang S., Lee J. Generalized polynomial chaos expansion by reanalysis using static condensation based on substructuring. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2024;45(5):819–836. <https://doi.org/10.1007/s10483-024-3108-8>
32. Feng Y., Zhang M., Li G., Meng G. Finite element analysis and structure optimization of the middle groove of scraper conveyor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;616:012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/616/1/012022>
33. Sun Y., Lu Y., Song Z. Review on the theories and applications of dynamic condensation and component mode synthesis methods in solving FEM-based structural dynamics. *Acta Mechanica Sinica*. 2023;36(3):361–389. <https://doi.org/10.1007/s10338-023-00383-2>
34. Ge C., Liu Z., Miao T., Huo Y., Wu J., Cui M., Han J. Strength analysis and optimization of three-bridge rigid frame for mining dump truck using finite element stress linearization method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2343:012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2343/1/012025>
35. Zhang Q., Zhang R.X., Tian Y. Scraper conveyor structure improvement and performance comparative analysis. *Strength of Materials*. 2020;52(4):683–690. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00218-2>

#### Информация об авторах

**Лазарев Артур Дмитриевич** – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Жуков Иван Алексеевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9068-3201>; e-mail: [tmmiok@yandex.ru](mailto:tmmiok@yandex.ru)

#### Information about the authors

**Artur D. Lazarev** – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

**Ivan A. Zhukov** – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9068-3201>; e-mail: [tmmiok@yandex.ru](mailto:tmmiok@yandex.ru)

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 10.08.2026

#### Article info

Received: 02.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 10.08.2026