

---

---

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_3\_17

УДК 621.876.11

*В. А. Далимаев, А. В. Куцепенко, М. Э. Подымако, Г. С. Синицын*

---

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ СКЛАДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ КРЫШИ КАБИНЫ ЛИФТА

---

*V. A. Dalimaev, A. V. Kutsepolenko, M. E. Podymako, H. S. Sinitsyn*

---

## COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL APPROACH TO DEVELOPING FOLDABLE ROOF RAILING FOR THE ELEVATOR CABIN

---

### Аннотация

Приведена последовательность получения валидированной математической модели складного ограждения крыши кабины лифта для проектной, на предварительной стадии разработки, оценки напряжений и деформаций и проверки соответствия требованиям нормативных документов EN 81–20:2014 и ГОСТ 33984.1–2016. Для определения расчетных напряжений и прогибов использован метод конечных элементов. Проведена проверка сеточной сходимости расчетной модели и выбран компромиссный с точки зрения длительности расчета и точности размер конечного элемента для измерения напряжений в физических экспериментах – натурная тензометрия проволочными тензорезисторами. По результатам первичного сравнения расчетных и реальных прогибов выполнен доработка расчётной модели введением дополнительных элементов и ее перерасчет. В итоге получена расчетная модель, которая с расхождением в пределах 15 % позволяет спрогнозировать напряжения и прогибы в конструкции до ее изготовления.

### Ключевые слова:

складные ограждения лифта, уменьшенный верхний этаж лифтовой шахты, металлоконструкции, метод конечных элементов, валидированная расчетная модель, напряжения, прогибы.

### Для цитирования:

Расчетно-экспериментальный подход к разработке складного ограждения крыши кабины лифта / В. А. Далимаев, А. В. Куцепенко, М. Э. Подымако, Г. С. Синицын // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3 (76). – С. 17–29.

### Abstract

The paper presents the sequence of obtaining a validated mathematical model of foldable railing mounted on top of the elevator cabin for design assessment of stress and strain at the preliminary stage of development and for verification of compliance with the requirements of the EN 81–20:2014 and GOST 33984.1–2016 normative documents. The finite element method was used to determine design stresses and deflections. The grid convergence of the computational model was tested and a compromise size of the finite element was chosen in terms of calculation time and accuracy to measure stresses in physical experiments – full-scale tensometry with wire strain gauges. Based on the results of the initial comparison of calculated and real deflections, the computational model was refined by introducing additional elements and recalculated. As a result, a computational model was obtained, which, with a discrepancy within 15 %, makes it possible to predict stresses and deflections in the structure before its manufacture.

### Keywords:

foldable elevator railings, reduced upper floor of the elevator shaft, metal structures, finite element method, valid design model, stresses, deflections.

### For citation:

Computational and experimental approach to developing foldable roof railing for the elevator cabin / V. A. Dalimaev, A. V. Kutsepolenko, M. E. Podymako, H. S. Sinitsyn // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 3 (76). – P. 17–29.

---

## Введение

Лифт – это совокупность взаимосвязанных систем и конструкций, главной целью которого является безопасная и комфортная перевозка пассажиров. Однако, кроме видимой части кабины, у лифта есть невидимая пассажирская часть, которая также должна обладать безусловной надежностью при обеспечении безопасности монтирующего и обслуживающего лифт персонала. Наряду с этим, свои требования накладывает рынок, который требует более дешевых товаров, но без снижения надежности. Лифт не существует сам по себе, а встраивается, по крайней мере на текущий момент, в строительную часть, здание, стоимость которого значительна и переходит на покупателя. Уменьшение объемов строительных работ способствует снижению конечной стоимости, а значит, является важной для решения задачей. Лифты с уменьшенными размерами приямка и верхнего этажа снижают объем строительных работ и приобретают все большее распространение. Уменьшение размеров доступных пространств требует разработки более компактных узлов главного привода, приямка, а также узлов, установленных на крыше кабины. Одним из узлов, обеспечивающих безопасность монтирующему и обслуживающему персоналу при нахождении на крыше кабины, являются ограждения. Требования безопасности к ним регламентированы стандартами EN 81–20:2014 и ГОСТ 33984.1–2016.

*Целью работы* являлось создание расчетно-экспериментального подхода к разработке ограждений кабины лифта, позволяющего на стадии проектирования спрогнозировать ее поведение под нагрузкой и проверить выполнение требований стандартов.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- выбор конструктивного исполнения;

- подбор рациональных профилей и их размеров проведением проектных расчетов в виде серии вычислительных экспериментов;

- выполнение уточненного расчета для оценки прочности и жесткости ограждений с выбранными профилями;

- разработка комплекта конструкторской документации;

- изготовление и испытания;

- уточнение и корректировка расчетных моделей до соответствия результатам экспериментов с достаточной точностью.

## Основная часть

Одним из методов разрешения противоречий в теории решения изобретательских задач является использование другого измерения: если высота элемента регламентирована и уменьшить ее нельзя, то необходимо перевести ее в длину или ширину, т. е. в другую плоскость. Это дает направление на создание складных ограждений, которые в рабочих режимах лежат горизонтально на кабине, а при монтаже или обслуживании устанавливаются вертикально. На текущий момент ограждения подобного исполнения имеются у ряда производителей лифтов (рис. 1).

Известно складное перильное ограждение крыши кабины лифтов фирм FELESA (см. рис. 1, а) [1], OTIS (см. рис. 1, б) [2]. Ограждение состоит из жестко закреплённых опор, на которых установлены стойки, поперечина и поручень. В рабочем положении отверстия в стойке совпадают с отверстиями в опоре и блокируются стопорным элементом от складывания. Данная конструкция ограждений решает задачу уменьшения габаритных размеров кабины и соблюдения требований безопасности для персонала, однако имеет ряд недостатков:

- для установки ограждения в рабочее положение необходимо поочередно поднять секции ограждения и зафиксировать;

сировать ближайшую стойку стопорным элементом, не заходя на кабину. Для последующей фиксации остальных стоек требуется передвижение обслуживающего персонала по крыше кабины без обеспечения безопасности, т. к. ограждение не имеет прочности, обусловленной креплением. Аналогичная ситуация при обратном демонтаже ограждения;

- для обеспечения безопасности

при перемещении лифта требуются дополнительные выключатели, контролирующие каждый фиксирующий стопорный элемент.

На основе анализа материалов [1, 2] и с учетом недостатков конструкций была предложена конструктивная схема складных ограждений крыши кабины лифтов ОАО «Могилевлифтмаш».

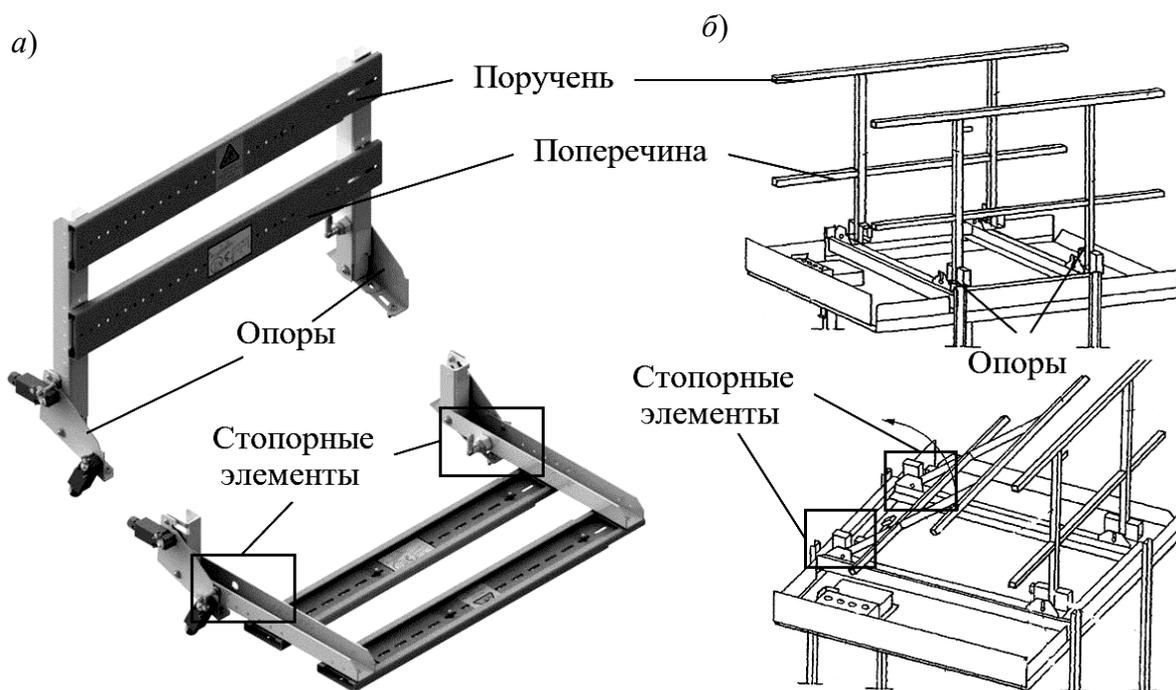


Рис. 1. Перильные ограждения: а – складное перильное ограждение крыши кабины лифта фирмы FELESA; б – складное перильное ограждение крыши кабины лифта фирмы OTIS

Основными элементами конструкции складных ограждений ОАО «Могилевлифтмаш» являются (рис. 2):

- 1) опоры – жёстко зафиксированные на крыше кабины;
- 2) стойки – шарнирно установленные на опорах;
- 3) поручень и поперечина – жестко установленные на стойках;
- 4) тяга – установленная в опорах с возможностью продольного перемещения для ограничения складывания.

Конструкция состоит из жёстко закреплённых опор, на которых подвижно

установлены стойки. Опоры закреплены на крыше кабины, в каждой из опор установлена ось с закрепленной на ней с возможностью поворота одним из своих концов стойкой, каждая из стоек в рабочем положении имеет возможность контакта с одним из стопорных элементов и не имеет возможности поворота при этом контакте, свободные концы стоек жестко соединены между собой поручнем, а центральные части – поперечиной, каждая из опор имеет возможность контакта со стопорным элементом, который имеет возмож-

ность перемещения относительно опоры вдоль оси, установленной в этой

опоре, а все стопорные элементы жестко связаны между собой.

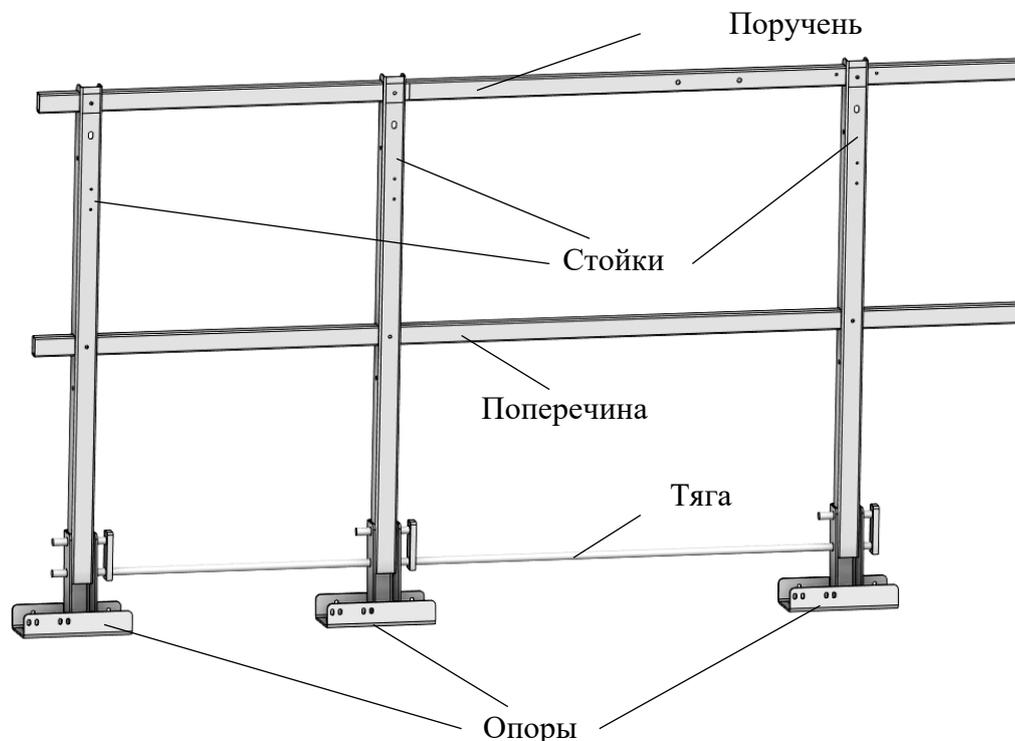


Рис. 2. Модель оригинального складного ограждения ОАО «Могилевлифтмаш»

Основными требованиями, предъявляемыми к складному ограждению, являются его способность выдерживать усилия, которые указаны в нормативных документах (EN 81–20:2014, ГОСТ 33984.1–2016), возможность его раскладывания и складывания, а также фиксации в нужном положении, при условии отсутствия в эти моменты обслуживающего персонала на крыше кабины лифта.

Для выполнения требований по EN 81–20:2014 основными целевыми показателями являются:

- 1) отсутствие пластических деформаций после снятия нагрузки величиной 1000 Н в любом направлении;
- 2) прогиб не более 50 мм при действии нагрузки;
- 3) высота ограждения не менее 1100 мм;

4) наличие поперечины, расположенной на половине высоты ограждения.

В качестве метода расчета напряжений и прогибов ограждения использовался метод конечных элементов. Проектные расчеты, на основании которых выбирались целесообразные для использования профиля, осуществлялись путем создания параметризованной балочной модели и проведения серии вычислительных экспериментов. Факторами варьирования являлись геометрические размеры сечений, ограничения – максимальные перемещения и напряжения, целевой функцией – масса. Целью данных расчетов являлось не получение окончательных размеров сечений, а сравнение вариантов сочетания типов профилей для различных элементов ограждения по критерию материалоемкости при выполнении требований по прочно-

сти и жесткости. Балочная модель была выбрана как наиболее оперативно реализуемая, но при этом дающая требуемую информацию. Вид балочной модели представлен на рис. 3, а, б, схема граничных условий – на рис. 3, в. Нагрузка приложена к консоли, как наиболее уда-

ленной от опоры точке.

Были рассмотрены три варианта сочетаний типов профилей. На основании решения задачи оптимизации при наличии ограничений (прогибы не более 50 мм и отсутствие остаточных деформаций) получены массы ограждений (табл. 1).

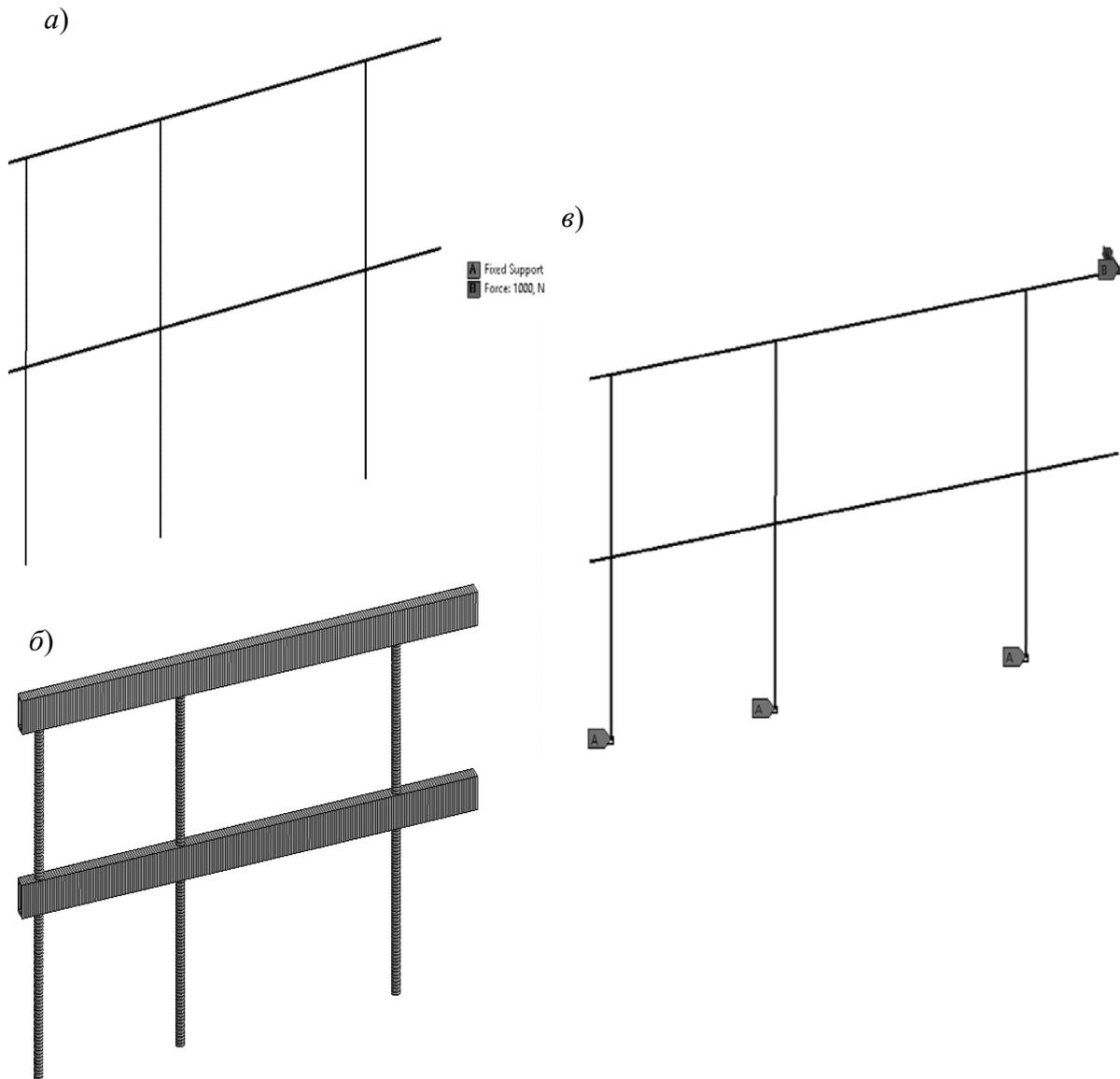


Рис. 3. Балочная модель: а, б – вид балочной модели; в – граничные условия

Результаты подбора сочетания сечений показали, что нет явно выраженного оптимального варианта, который

обеспечивал бы существенно меньшую материалоемкость, разница между самым «легким» и самым «тяжелым» ва-

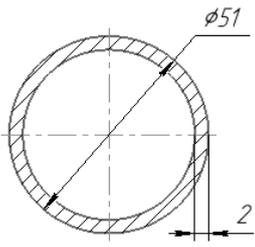
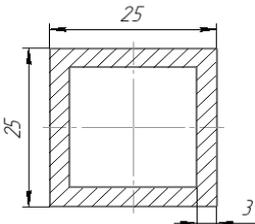
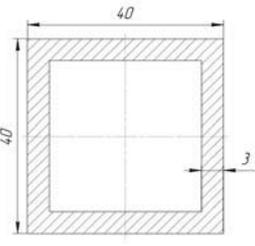
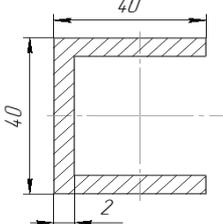
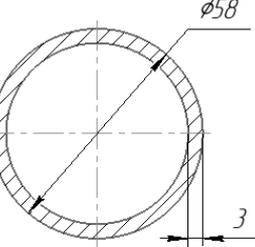
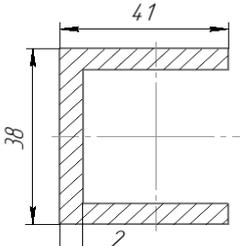
риантами составила 1,2 кг, или 7,8 %.

Исходя из применимости профилей на предприятии, а также условий технологичности конструкции были выбраны П-образный открытый профиль 44 × 44 × 2 мм для стоек и пря-

моугольная труба 40 × 25 × 2 мм для поручня и поперечины.

С использованием модели с трехмерными конечными элементами выполнен расчет согласно расчетной схеме на рис. 4.

Табл. 1. Подбор формы и сечения

Стойка	Поручень, поперечина	Масса ограждений, кг
		16,4
		15,4
		16,6

Места установки виртуальных тензорезисторов указаны на схеме как «Датчик 1» – «Датчик 3», которые моделировались согласно подходу [3]. Была выполнена проверка сеточной сходимости модели. Сеточная сходимость позволяет найти компромисс между точностью математической модели и ее

ресурсоемкостью в показателях мощности вычислительных ресурсов и времени вычислений и установить максимальный размер конечного элемента, уменьшение которого не повышает точность решения.

На рис. 5 представлены результаты анализа сеточной сходимости.

A Force: 1000, N  
B Fixed Support

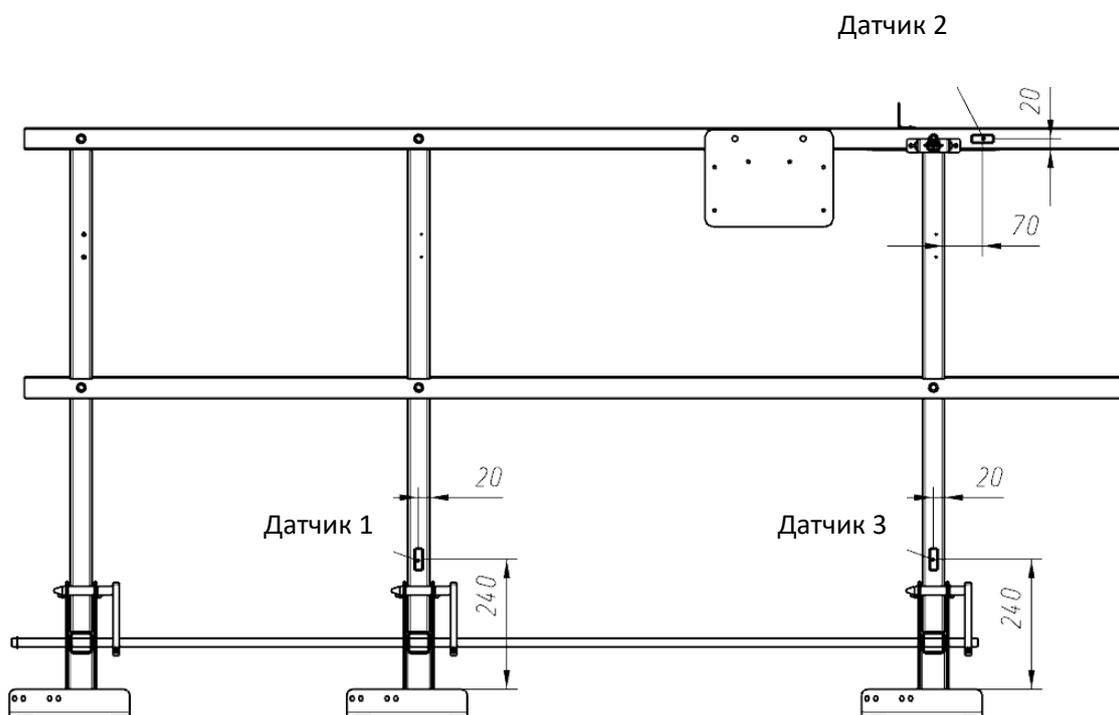
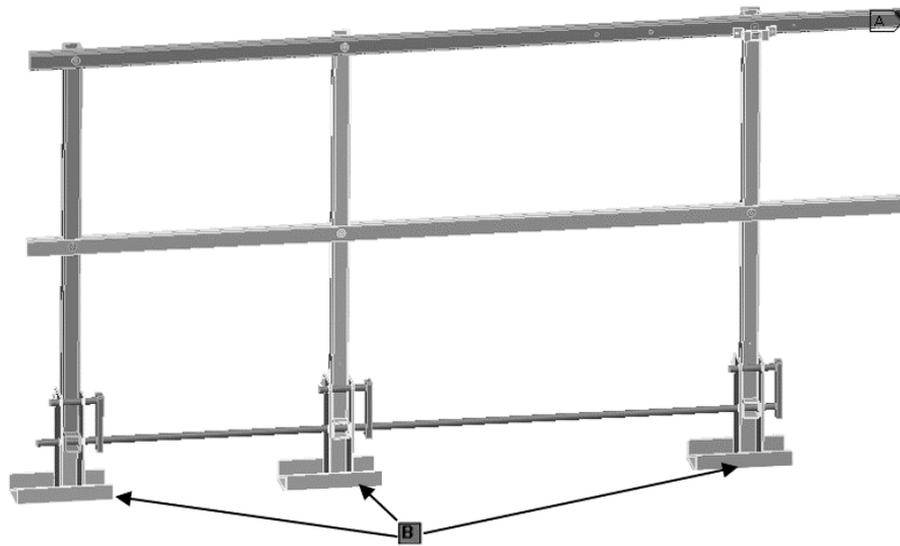


Рис. 4. Расчетная схема с указанием мест установки и ориентации виртуальных тензорезисторов

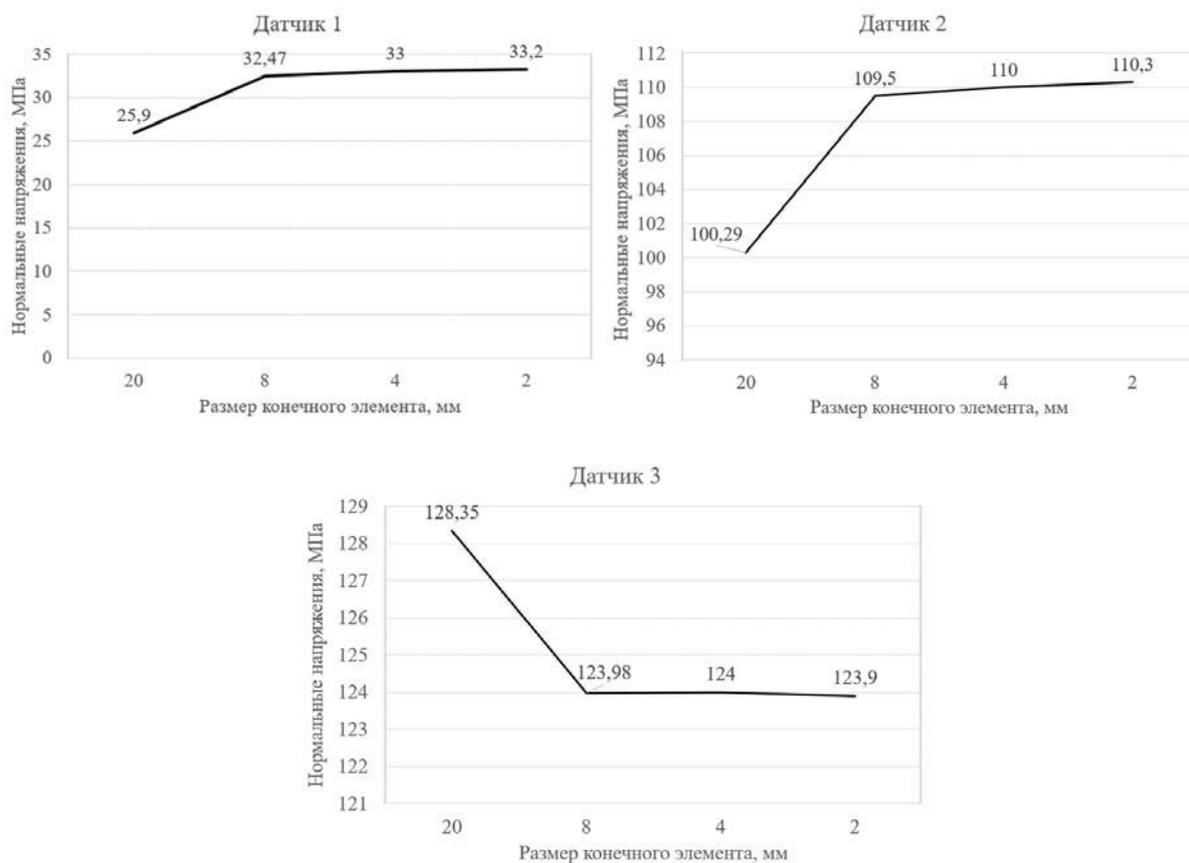


Рис. 5. Результаты проверки сеточной сходимости

В итоге была принята модель с размером конечного элемента 8 мм, компромиссная по длительности расчета и его точности.

После проведения расчета с выбранными профилями обнаружена область возможной потери устойчивости формы открытого профиля (деформация при нагрузке 800 Н составляет 250 мм, наблюдались пластические деформации) (результаты не приведены) и принято решение заменить стойки профильной трубой прямоугольного сечения  $40 \times 40 \times 3$  мм, а также поперечину полосой  $2015 \times 57 \times 2$  мм с отгибом  $2015 \times 17 \times 2$  мм. Общий вид новой конструкции представлен на рис. 6. Консольная часть поручня укреплена накладкой как самая нагруженная

часть ограждения. Дальнейшие расчеты и испытания выполнялись для измененной конструкции (рис. 7 и 8).

Полученные напряжения и перемещения удовлетворяют условиям, поставленным в работе, и не меняются при реверсировании нагрузки.

Испытания складных ограждений проводились в «наземном» варианте на базе испытательного центра ОАО «Могилевлифтмаш» без установки на лифт (рис. 9).

Ограждения были закреплены на жестком основании, разложены в рабочее положение, и поэтапно, с шагом 200 Н, прикладывалась возрастающая нагрузка. На каждом шаге нагружения фиксировались прогибы ограждений согласно схеме на рис. 10 и велась запись показаний тензорезисторов.

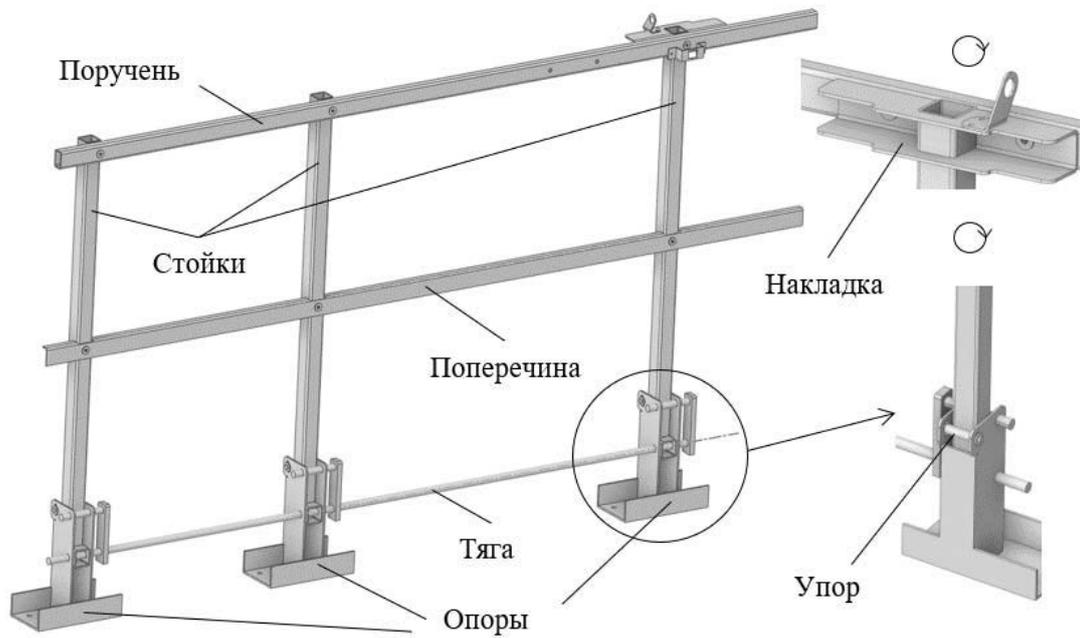


Рис. 6. Доработанная конструкция ограждений

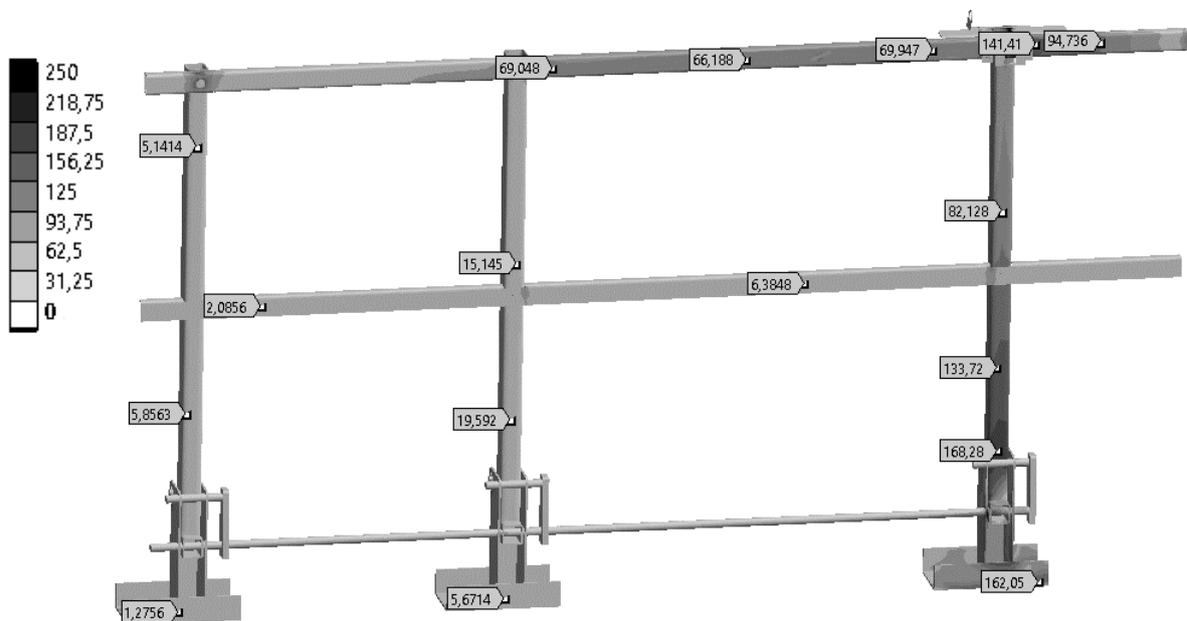


Рис. 7. Эквивалентные напряжения

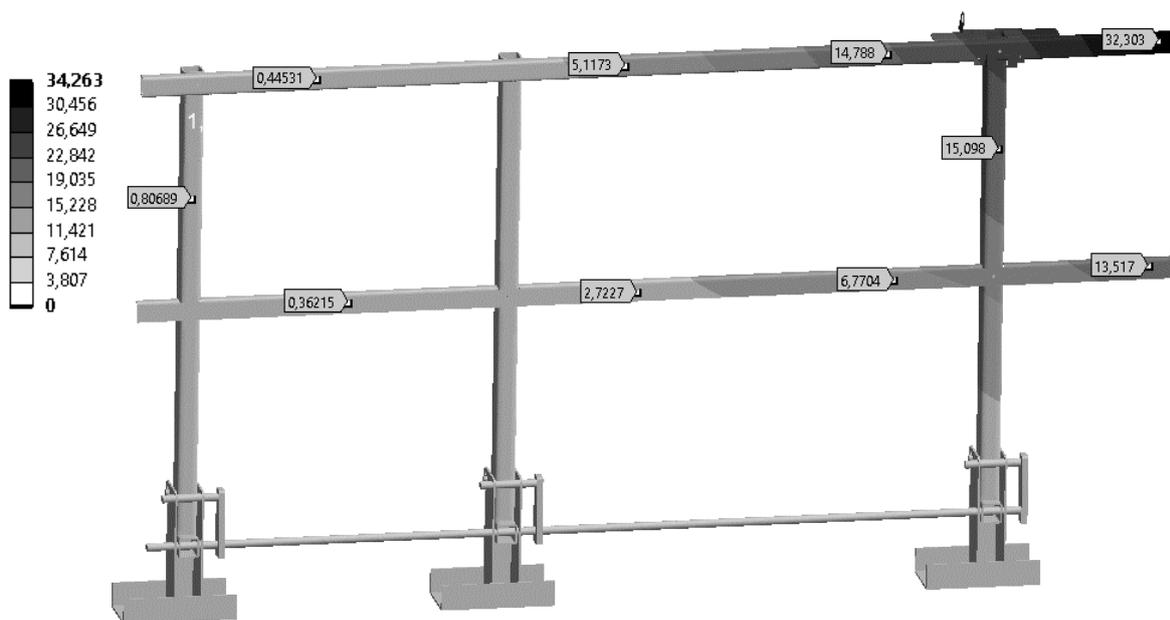


Рис. 8. Результирующие перемещения

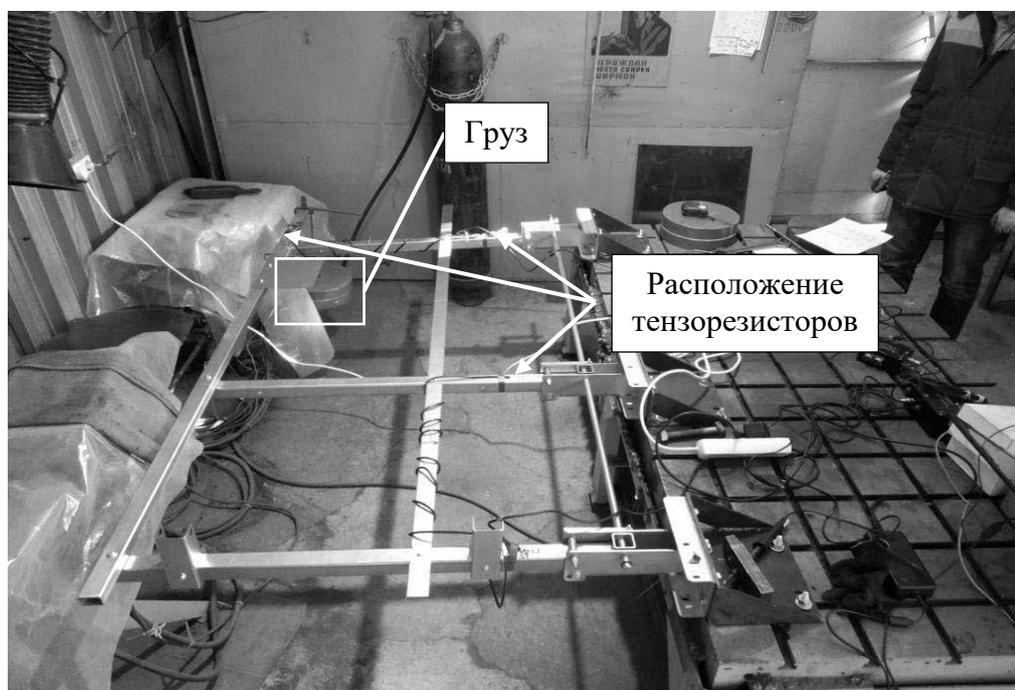


Рис. 9. Испытания ограждения

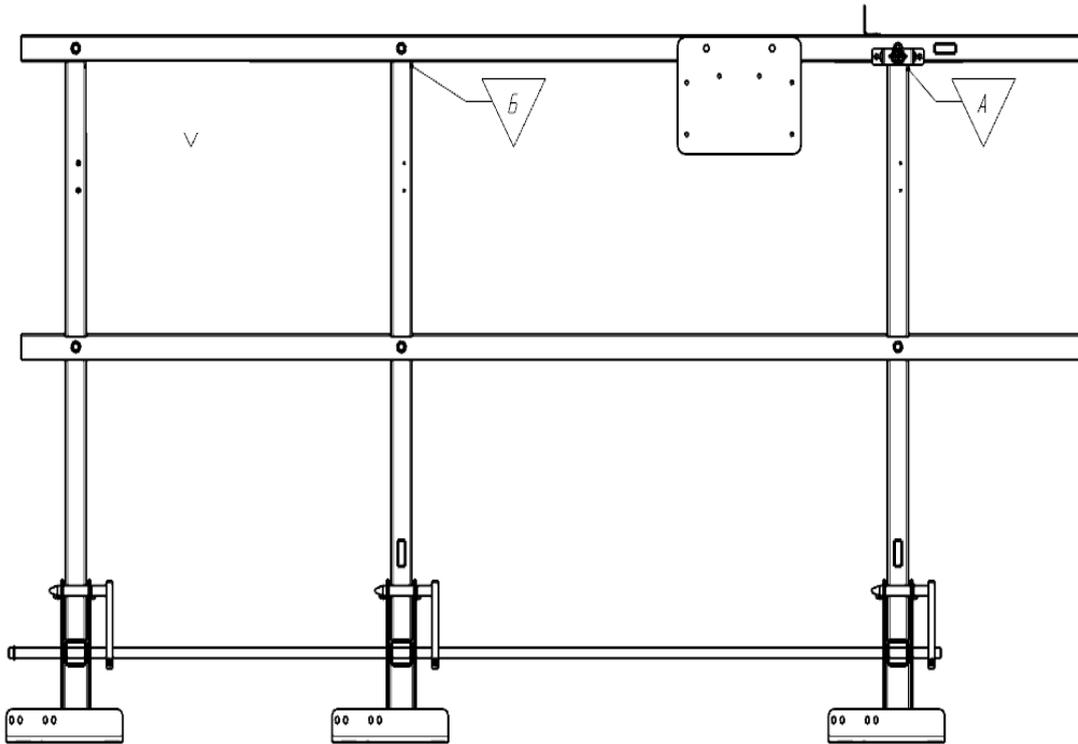


Рис. 10. Места измерения прогибов

Схема установки и ориентации одноосевых проволочных тензорезисторов соответствовала схеме установки «виртуальных» тензорезисторов (см. рис. 4). После снятия нагрузки на стойке и поручне оценивалось наличие остаточных деформаций.

При сопоставлении прогибов по результатам физических измерений и полученных на основе расчетной модели обнаружено существенное расхождение. В расчетном варианте перемещения в точке А составляли 32 мм, а по результатам эксперимента – 50 мм, расхождение составило 36 %. Вследствие этого была осуществлена доработка расчетной модели добавлением кронштейнов крепления ограждений, которые использовались во время испытаний, а также воспроизведением геометрии прерывистых сварных швов (рис. 11), после чего был выполнен пересчет.

Сопоставление напряжений и прогибов, полученных по результатам физических экспериментов и расчетной

модели, приведено в табл. 2 и 3.

Расхождения по прогибу при максимальной нагрузке между расчетной моделью и физическим экспериментом в точках А и Б составили не более 12 %. Расхождение показаний тензорезисторов 2 и 3 с результатами экспериментов не превышает 15 %, что является удовлетворительным результатом. Показания датчика 1 дают наибольшее расхождение с экспериментом, что может быть объяснено различными причинами (некачественный монтаж, повреждения при испытаниях), а так как этот датчик не находится в области максимальных напряжений, его показаниями можно пренебречь. Поскольку напряжения и прогибы по результатам физических измерений оказались выше значений по результатам реализации математической модели, а модель в пределах диапазона нагружений ведет себя как линейная, был введен поправочный повышающий коэффициент 1,2 для расчетных напряжений и прогибов.

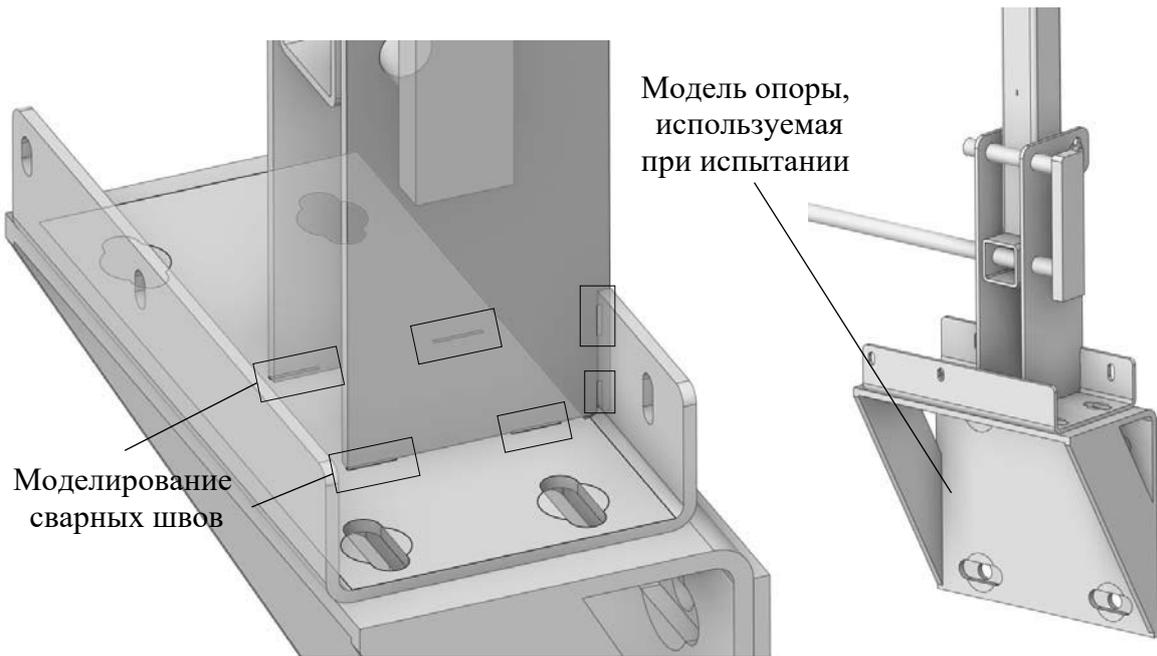


Рис. 11. Дорабатываемые в расчетной модели детали и узлы ограждения

Табл. 2. Сопоставление прогибов

Нагрузка, Н	Прогиб в точке Б, мм		Прогиб в точке А, мм	
	Эксперимент	Модель	Эксперимент	Модель
200	1	1,5	-15	-7
400	-2	-3	-25	-14
600	-3,5	-4	-35	-22
800	-6	-6	-40	-32
1000	-10	-9	-50	-44

Табл. 3. Сопоставление напряжений

Нагрузка, Н	Напряжение в датчике 1, МПа		Напряжение в датчике 2, МПа		Напряжение в датчике 3, МПа	
	Эксперимент	Модель	Эксперимент	Модель	Эксперимент	Модель
200	2	4,8	26	22	28	25,6
400	4	10	54	44	56	51
600	4	16	82	66	86	77
800	5	23	107	88	111	102
1000	7	32	129	110	139	124

### Заключение

По результатам проведенной работы был реализован расчетно-экспериментальный подход к ограждению крыши кабины лифта:

– основанный на проверке сеточной сходимости модели и выборе компромиссного с точки зрения длительности расчета и точности размера конечного элемента;

– базирующийся на валидации физическими экспериментами методом

натурной тензометрии;

– включающий использование несущих элементов из профилей согласно ограничительному перечню цветных и черных металлов ОАО «Могилевлифтмаш»;

– позволяющий осуществить цикл разработки схожих конструкций с минимальным количеством опытных образцов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. BALUSTRADÉ TOIT CABINE PLIABLE EN 81-20:2014 H700 1200 < L < 1400, фирма FELESA [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.felesa.com/shop/img/cms/417191.pdf>.
2. FOLDABLE HANDRAIL AND SAFETY SWITCHARRANGEMENT ON TOP OF AN ELEVATOR CAR [Electronic resource]: pat. US 8365870B2 / G. Inventor, P. Sirigu, O. Rebillard, D. Dukacz, A. Goulet, J.-N. Simonot, D. Cloux, F. Pillin, F. Picard, T. Beauchaud, M. Coquerelle, N. Beeuwsaert, A. Fonteneau, F. Monzon, P. Rio, D. Herkel. – Publ. date 30.06.2006. – Mode of access: <https://patents.google.com/patent/US8365870B2/en>.
3. Моделирование тензодатчика в Ansys mechanical [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://youtu.be/sScfhHrvZS0>.

*Статья сдана в редакцию 16 июня 2022 года*

**Владимир Александрович Далимаев**, инженер-конструктор отраслевой лаборатории НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш». E-mail: [bn\\_ntc@liftmach.by](mailto:bn_ntc@liftmach.by).

**Александр Владимирович Куцепенко**, начальник бюро по научной работе отраслевой лаборатории НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш». E-mail: [bn\\_ntc@liftmach.by](mailto:bn_ntc@liftmach.by).

**Максим Эдуардович Подымако**, зав. отраслевой лабораторией НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш». E-mail: [bn\\_ntc@liftmach.by](mailto:bn_ntc@liftmach.by).

**Герман Сергеевич Синицын**, инженер-конструктор ОНП НТЦ, ОАО «Могилевлифтмаш». E-mail: [onp@liftmach.by](mailto:onp@liftmach.by).

**Vladimir Aleksandrovich Dalimaev**, design engineer of STC branch laboratory, JSC Mogilevliftmach. E-mail: [bn\\_ntc@liftmach.by](mailto:bn_ntc@liftmach.by).

**Alexandr Vladimirovich Kutsepolenko**, Head of the Scientific Research Department of STC branch laboratory, JSC Mogilevliftmach, MSc (Engineering). E-mail: [bn\\_ntc@liftmach.by](mailto:bn_ntc@liftmach.by).

**Maksim Eduardovich Podymako**, Head of the STC branch laboratory, JSC Mogilevliftmach. E-mail: [bn\\_ntc@liftmach.by](mailto:bn_ntc@liftmach.by).

**German Sergeevich Sinitsyn**, design engineer of STC Non-Core Production Department, JSC Mogilevliftmach. E-mail: [onp@liftmach.by](mailto:onp@liftmach.by).