

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 69.057

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-78-94>

Перспективы применения ЛЕГО-блоков для возведения складских и емкостных сооружений агропромышленного комплекса

Чжан Юань , А.Ю. Прокопов 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 kalashnikov1947a1@gmail.com



EDN: IRYTYS

Аннотация

Введение. Основной задачей при проектировании складских и емкостных сооружений, строительные конструкции которых воспринимают горизонтальные эксплуатационные нагрузки, является не только обеспечение прочности, несущей способности и допустимых вертикальных деформаций (осадок), но и устойчивость и работоспособность при действии горизонтальных эксплуатационных нагрузок, вызванных боковым давлением от веса жидкостей или сыпучих материалов. Традиционные конструкции таких сооружений из монолитного железобетона или металла отличаются высокой материалоемкостью, трудоемкостью и продолжительностью возведения (монтажа). В статье рассмотрены перспективы строительства емкостных и складских сооружений из сборных быстровозводимых блоков различных конструкций.

Материалы и методы. Выполнен анализ применяемых конструкций и технологий возведения емкостных и складских сооружений, выявлены их основные недостатки и проблемы, возникающие на стадиях строительства и эксплуатации. Предложены новые конструкции ЛЕГО-блоков и технология монтажа быстровозводимых зданий и сооружений с использованием метода вертикального армирования кладки для восприятия горизонтальных эксплуатационных нагрузок. Выполнено математическое моделирование и расчет параметров напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) конструкций складских сооружений из ЛЕГО-блоков, возникающего при действии постоянных и временных эксплуатационных нагрузок от веса жидкостей или сыпучих материалов.

Результаты исследования. Разработаны новые конструкции ЛЕГО-блоков, предложена технология сооружения из них быстровозводимых складских и емкостных объектов, определены рациональные параметры вертикального армирования кладки из ЛЕГО-блоков в зависимости от высоты сооружения и уровня заполнения емкостей жидкими и сыпучими материалами.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и строительстве емкостных и складских сооружений сельскохозяйственного и иного назначения. Внедрение таких конструкций предполагает увеличение темпов строительства, улучшение контроля качества возведения и научное обоснование мониторинга технического состояния в процессе эксплуатации объекта.

Ключевые слова: емкостные сооружения, склады, быстровозводимые конструкции, ЛЕГО-блоки, математическое моделирование

Для цитирования: Чжан Юань, Прокопов А.Ю. Перспективы применения ЛЕГО-блоков для возведения складских и емкостных сооружений агропромышленного комплекса. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):78–94. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-78-94>

Prospects for the Use of LEGO Blocks for the Construction of Warehouse and Storage Facilities of the Agro-Industrial Complex

Zhang Yuan , Albert Yu. Prokopov 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ kalashnikov1947a1@gmail.com

Abstract

Introduction. The major task in designing warehouse and storage facilities whose building structures experience horizontal operational loads is not only ensuring strength, load-bearing capacity and permissible vertical deformations (residue), but also stability and operability under the action of horizontal operational loads caused by lateral pressure from the weight of liquids or bulk materials. Traditional constructions of such structures made of monolithic reinforced concrete or metal are characterized by high material consumption, labor intensity and duration of construction (assembly). The article explores the prospects for constructing warehouse and storage facilities from prefabricated blocks of various structures.

Materials and Methods. Applied structures and technologies for constructing warehouse and storage facilities have been analyzed, their main disadvantages and issues arising at the stages of construction and operation have been identified. New structures of LEGO blocks and technology for the assembly of prefabricated buildings and structures using the method of vertical reinforcement of masonry for perceiving horizontal operational loads are set forth. Mathematical modeling and calculation of the parameters of the stress-strain state (hereinafter referred to as SSS) of warehouse structures made of LEGO blocks under the action of permanent and temporary operational loads from the weight of liquids or bulk materials has been conducted.

Research Results. New designs of LEGO blocks have been developed, a technology of constructing prefabricated warehouse and capacitive objects from them has been set forth, the regional parameters of vertical reinforcement of masonry from LEGO blocks have been identified depending on the height of the structure and the level of filling containers with liquid and bulk materials.

Discussion and Conclusion. The results are recommended for use in the design and construction of warehouse and storage facilities for agricultural and other purposes. The introduction of such structures implies an increase in the pace of construction, enhanced quality control of construction and a scientific justification for monitoring a technical condition during operation of a facility.

Keywords: storage facilities, warehouses, prefabricated structures, LEGO blocks, mathematical modeling

For citation: Yuan Zh, Prokopov AYu. Prospects for the Use of LEGO Blocks for the Construction of Warehouse and Storage Facilities of the Agro-Industrial Complex. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):78–94. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-78-94>

Введение. Проектирование и строительство складских и емкостных сооружений имеет ряд особенностей, которые определяются прежде всего их назначением и технологическими процессами, предусмотренными на таких объектах. В настоящей статье рассмотрим сооружения сельскохозяйственного назначения, предназначенные для длительного хранения сыпучих (зерно, семена, гранулированные удобрения, комбикорма и т.п.) и жидких (вода, меласса, минеральные удобрения типа КАС (карбамидно-аммиачная смесь)) материалов.

Для длительного хранения сыпучих материалов в сельском хозяйстве традиционно используют одноэтажные складские помещения каркасного типа, конструкции и инженерные системы которых рассчитаны на хранение определенного типа продукции, например, зернохранилища, овощекртофелехранилища, кукурузохранилища и др. Проектирование несущих конструкций таких складов зависит от способа хранения продукции и, соответственно, распределения эксплуатационных нагрузок. При хранении продукции (зерна, семян, овощей) насыпью на стены склада могут передаваться значительные горизонтальные нагрузки, которые зависят от высоты насыпи, удельного веса продукции, а также удельного сцепления и трения между частицами по аналогии с песком, щебнем и другими дисперсными грунтами (материалами).

Другим распространенным видом хранилищ сельскохозяйственной продукции являются бункерные (закромные) и силосные (башенные) резервуары. Для их изготовления или монтажа используют как монолитный железобетон или железобетонные блоки, так и стальные конструкции: металлические листы, тонколистовые волнистые стальные секции и др.

Известны научные исследования в области проектирования и строительства складских и емкостных сооружений, в т. ч. сельскохозяйственного назначения, результаты которых изложены в диссертациях. Гольденберга Л.И. [1], Сазанбаева С.К. [2], Стрельцова И.В. [3], Карсункина В.В. [4], Рашепкина С.В. [5], Фейденгольда В.Б. [6], Марковича А.С. [7] и др.

В указанных работах выполнены исследования работы конструкций складских и емкостных сооружений при различных видах нагрузок, возникающих как в процессе строительства, так и при эксплуатации объектов, включая процессы загрузки и выгрузки, учет технологических особенностей, климатических факторов и др. При этом использованы методы теоретической и строительной механики. На основании выполненных исследований разработаны рациональные конструкции складов, силосов, бункеров, элеваторов и других объектов сельскохозяйственного назначения, а также правила и рекомендации по безопасной эксплуатации таких объектов с учетом особенностей происходящих в них технологических процессов и требований к обеспечению климатических параметров (температуры, влажности, подвижности воздуха).

На современном этапе к таким объектам предъявляются повышенные технико-экономические и эксплуатационные требования, в т. ч. обеспечение высокой эффективности и надежности на протяжении всего жизненного цикла объекта. Поэтому разработка новых конструктивных и технологических решений в проектировании, строительстве, эксплуатации и демонтаже складских и емкостных сооружений для агропромышленного комплекса (АПК) является актуальной научной и практической задачей.

Целью настоящей статьи является анализ достоинств и недостатков существующих складских и емкостных сооружений, применяемых в агропромышленном комплексе, и разработка новых конструктивных и технологических решений на основе применения быстровозводимых ЛЕГО-блоков, обеспечивающих высокую эффективность строительства и безопасность длительной эксплуатации таких объектов.

Материалы и методы. К основным методам исследований, использованным авторами при подготовке статьи, относятся:

- анализ результатов современных научных исследований и изучение отечественного и зарубежного опыта проектирования, строительства и эксплуатации складских и емкостных сооружений;
- выявление достоинств и недостатков применяемых конструкций, оценка современных требований к таким объектам и определение перспективных направлений их совершенствования, включая изучение возможности использования быстровозводимых ЛЕГО-блоков для возведения несущих конструкций складов и резервуаров;
- конструкторская работа по разработке и обоснованию параметров универсальных ЛЕГО-блоков, позволяющих создавать армированную кладку несущих конструкций складов и резервуаров;
- создание математических моделей складских сооружений, возводимых из ЛЕГО-блоков, и исследование параметров их НДС, возникающего при действии сочетаний постоянных и эксплуатационных нагрузок от бокового давления хранимых сыпучих и жидких материалов при варьировании высоты сооружения, высоты насыпи (уровня жидкости), физико-механических свойств сыпучих и плотности жидких материалов;
- разработка рекомендаций по конструированию несущих стен складов и резервуаров (высота, толщина, армирование и др.) в зависимости от свойств и высоты засыпки (залитки) хранимой продукции.

Анализ применяемых в настоящее время конструкций складских помещений сельскохозяйственного назначения показывает, что широкое распространение получили каркасные одноэтажные здания с одним, двумя и более (реже) пролетами, состоящие из столбчатых фундаментов, колонн, балок или ферм перекрытия, ригелей, прогонов, наклонных связей и т.д. Такие здания предусматривают, как правило, внешние ограждающие конструкции из сэндвич-панелей, профнастила, других облегченных элементов, которые не являются несущими и не способны воспринимать горизонтальную эксплуатационную нагрузку от бокового давления сыпучего материала или продукции. В этом случае внутри таких складов приходится возводить дополнительные несущие вертикальные стены (монолитные или сборные), разделяющие различные материалы или сорта складываемой продукции и воспринимающие боковое давление (рис. 1 а). Возможен также комбинированный вариант устройства металлокаркаса и возведения до определенной высоты засыпки сыпучих материалов (продукции) монолитных железобетонных стен (рис. 1 б). Это повышает материалоемкость, трудоемкость и стоимость возведения складских сооружений. При небольшой высоте засыпки по краям здания боковую нагрузку могут воспринимать и стеновые панели, передающие эксплуатационную нагрузку через несущие металлические колонны с контрфорсами и дополнительные связи (рис. 1 в).

Аналогичные конструктивные решения используются и в зарубежной практике строительства и эксплуатации складских помещений агропромышленного комплекса. На рис. 2 приведены типовые здания, возводимые фирмой Accu-Steel, США [8], и предназначенные для хранения сыпучей сельскохозяйственной продукции. Несущие стены, воспринимающие горизонтальное давление от сыпучего материала, устраивают небольшой высоты из стеновых панелей (рис. 2 а), кладки — из железобетонных блоков (рис. 2 б) или ЛЕГО-блоков в сочетании с контрфорсами, позволяющими увеличить боковую нагрузку.



а)



б)



в)

Рис. 1. Примеры отечественных металлокаркасных конструкций складских помещений для хранения сельскохозяйственной продукции: а — со сборными внутренними стенами, воспринимающими горизонтальную эксплуатационную нагрузку; б — с внешними несущими железобетонными стенами на высоту засыпки; в — со стеновыми панелями, стержневыми контрфорсами и дополнительными связями



а)



б)



в)

Рис. 2. Примеры типовых зданий для агропромышленного комплекса фирмы Accu-Steel, США: а — сводчатой формы из металлокаркаса и тканевого покрытия с невысокими боковыми панелями (серия Advantage); б — с двухскатной кровлей из металлокаркаса, внешних и внутренних стен из железобетонных блоков для восприятия эксплуатационной горизонтальной нагрузки (серия Crossover); в — параболической формы каркаса из металлических ферм и невысоких несущих стен из железобетонных ЛЕГО-блоков с такими же контрфорсами (серия Integrity) [8]

Решения складских помещений и емкостных сооружений с вертикальными монолитными железобетонными стенами позволяют обеспечить одновременно несущую способность и устойчивость при действии боковых нагрузок и также находят применение в агропромышленном комплексе в виде хранилищ как силосного типа, так и складского типа (с напольным хранением) [9]. Однако они имеют также ряд недостатков, обусловленных конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами. К основным проблемам, возникающим при возведении монолитных железобетонных складских и емкостных сооружений, относятся: плохое или нестабильное качество бетона (ярко выраженная «слоистость» или «щебенистость», множество незаполненных полостей и явно непровибрированные слои), вследствие чего возникает сминание стенового бетона в горизонтальных сечениях и, как следствие, снижение срока службы и опасность быстрого наступления аварийного состояния. Кроме того, строительство таких объектов требует очень высокого качества, которое могут обеспечить немногие строительные организации с большим опытом работы в этой сфере. Железобетонные строения более трудоемки и на 20–30 % дороже, например, зернохранилищ с круглыми металлическими силосами большого диаметра, которыми их стали заменять [10].

Металлические емкости (силосы, бункеры, резервуары и др.) также находят широкое применение в агропромышленном комплексе для хранения как сыпучих, так и жидких продуктов. Наряду с неоспоримыми достоинствами таких конструкций (компактность вследствие вертикального расположения, прочность, быстрый монтаж, удобство эксплуатации при загрузке-разгрузке) они обладают целым рядом недостатков, в частности:

- высокая теплопроводность металла, которая может неблагоприятно сказываться на хранении продукции, например, зерна;
- опасность коррозионного износа металла и необходимость постоянной антикоррозийной защиты при эксплуатации;
- конденсация влаги на внутренних стенках, что может приводить к порче зерна, его самосогреванию и потере его потребительских, фуражных и семенных свойств;
- высокая чувствительность вертикальных резервуаров к неравномерным осадкам основания. Из практики авторов настоящей статьи известно несколько случаев кренов и сверхпроектных деформаций металлических резервуаров, используемых для хранения жидких пищевых продуктов, вследствие чего их дальнейшая эксплуатация стала невозможной без дорогостоящих мер по выравниванию кренов и усилению оснований и фундаментов [11]. Также имеется необходимость постоянного геотехнического мониторинга [12] с учетом взаимного влияния как самих резервуаров друг на друга, так и окружающей застройки [13];

– постоянно изменяющееся вследствие загрузки-разгрузки напряженно-деформированное состояние металлической оболочки резервуаров и абсолютно гибкой системы «металлическое днище — грунтовое основание» для типовых резервуаров с кольцевыми фундаментами, возводимыми только под стенки [14].

На основании вышеизложенного анализа достоинств и недостатков существующих конструкций складских и емкостных сооружений для агропромышленного комплекса можно сделать следующие выводы:

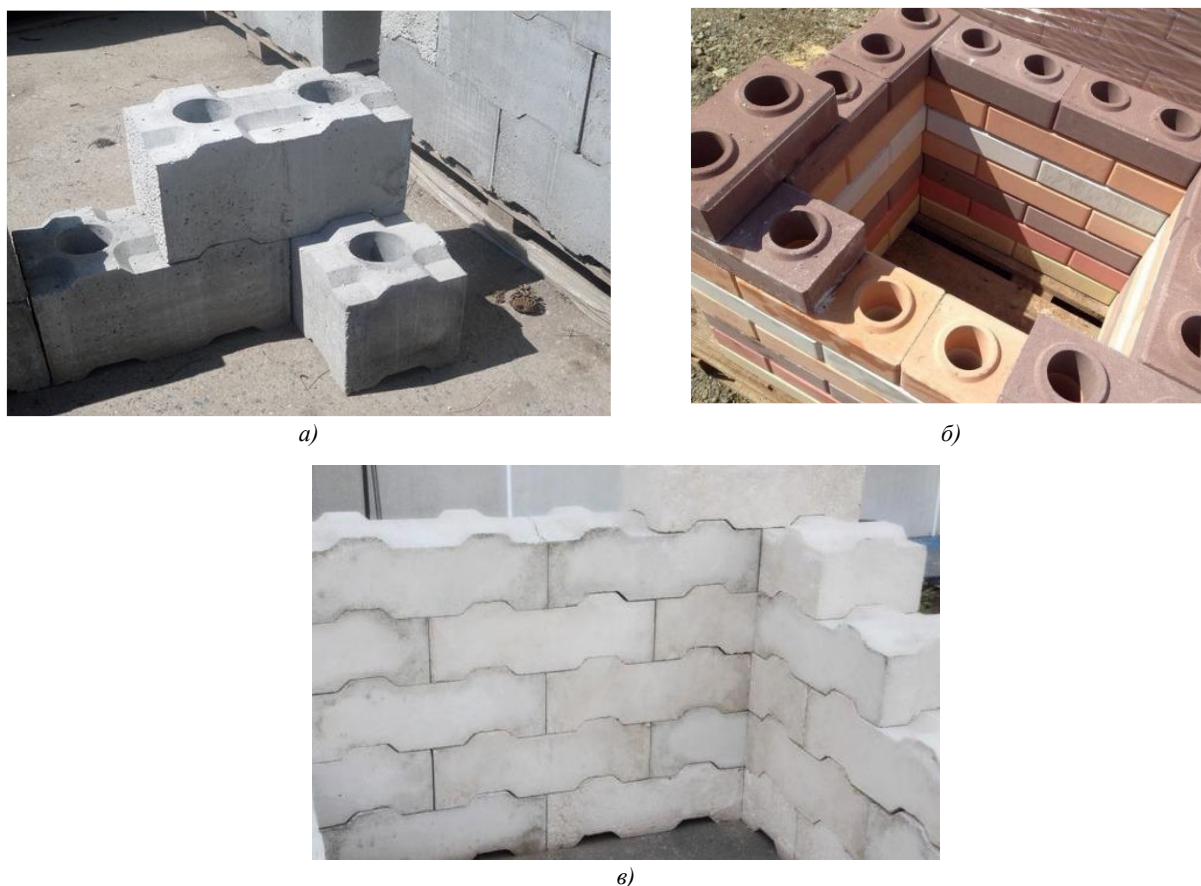
- большинство применяемых для данной цели каркасных зданий существенно ограничены по высоте из-за невозможности восприятия существенных горизонтальных эксплуатационных нагрузок, обусловленных боковым давлением насыпных продуктов или материалов (зерна, картофеля, удобрений и т.д.);
- задача разработки эффективных конструктивных решений, обеспечивающих высокие темпы строительства и надежную эксплуатацию при значительном боковом давлении на несущие стены, является актуальной;
- перспективным направлением совершенствования конструкций зданий агропромышленного комплекса является применение быстровозводимых бетонных ЛЕГО-блоков;
- основной проблемой внедрения таких конструкций является недостаточная несущая способность при работе на горизонтальные эксплуатационные нагрузки, так как большинство таких блоков укладываются «на сухую» и не имеют армирования кладки.

В настоящей работе предпринята попытка разработки и научного обоснования параметров армированной кладки из бетонных ЛЕГО-блоков, которая позволила бы строить и эксплуатировать высокие складские помещения с большой степенью загрузки (на большую высоту засыпки) при сохранении устойчивости и надежности в течение всего жизненного цикла объекта.

Результаты исследования. В настоящее время бетонные ЛЕГО-блоки производятся различными фирмами как в России, так и за рубежом.

Известен положительный опыт проектирования и строительства зданий из ЛЕГО-блоков (рис. 3 а) и ЛЕГО-кирпичей (рис. 3 б) в условиях Сибири [15].

Размер обычного блока: длина – 500 мм; высота – 220 мм; ширина – 250 мм. Специальная геометрия фасонных блоков обеспечивает удобный монтаж и надежное соединение.



а)

б)

в)

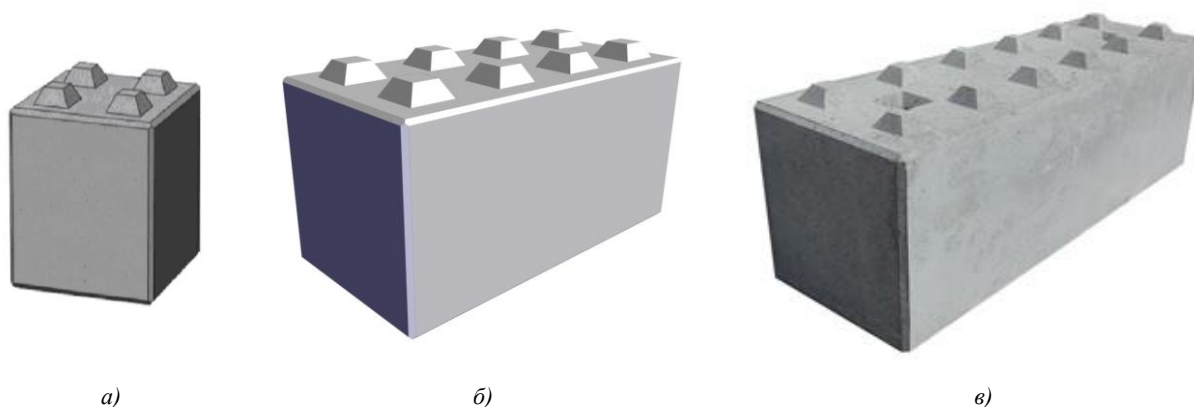
Рис. 3. Быстровозводимые конструкции, применяемые в Сибири: а — ЛЕГО-блоки, б — ЛЕГО-кирпичи; в — пример кладки из ЛЕГО-блоков из полистиролбетона без раствора [15]

В зависимости от типа строения рекомендуются три различных технологии строительства из ЛЕГО-блоков [15]:

- укладка без раствора;
- укладка без раствора с армированием;
- укладка на раствор.

В качестве основных недостатков таких блоков авторы [15] выделяют невозможность возведения высоких зданий и сооружений, недостаточную апробацию применения таких блоков в практике строительства, а также отсутствие нормативной базы.

Инженерно-строительной производственной группой компаний IS GROUP выпускаются фундаментные ЛЕГО-блоки серии ФБС (рис. 4) [16].



а)

б)

в)

Рис. 4. Фундаментные ЛЕГО-блоки холдинга IS GROUP [16]: а – ФБС 6-6-6; б – ФБС 12-6-6; в – ФБС 24-6-6 [16]

В качестве основных преимуществ таких блоков их производители отмечают следующие [16]:

- быстрое строительство — конструкция площадью около 50 м² может быть возведена всего за один час;
- отсутствие необходимости в связующем растворе или армировании — система соединения «шпунт-паз» не только удобна, но и позволяет сэкономить на покупке раствора и арматуры;

- многократность — ЛЕГО-блоки легко собираются и легко разбираются. Их можно использовать многократно и применять на разных объектах и для разных целей;

- надежное сцепление — строительные блоки отличаются высокой точностью сцепления, что гарантирует прочность конструкции на протяжении всего срока службы и позволяет выдерживать широкий спектр нагрузок и воздействий;

- независимость от времени года — из ЛЕГО-блоков можно строить независимо от времени года и погодных условий. Сам продукт и технологии его сборки являются «погодоустойчивыми». Ему не нужно ждать благоприятной погоды или особых температур. А это означает отсутствие простоев и потерь денег;

- ЛЕГО-блоки идеально подходят для строительства быстровозводимых временных зданий и малонагруженных конструкций. Это современная и высокоэстетичная европейская технология, которая обеспечивает качественный результат без больших затрат. Нужное количество блоков приобретается один раз и повторно используется после сноса.

В Ростовской области бетонные ЛЕГО-блоки различных типоразмеров производят:

- ООО «ЖелезобетонИнвест» (г. Ростов-на-Дону) — 21 типоразмер фундаментных блоков ФБШ [17];

- ООО «Торговый дом «Минерал» (п. Целина) — 10 типоразмеров универсальных бетонных ЛЕГО-блоков [18].

ООО «ТД Минерал» в 2025 г. разработало Технические условия ТУ 23.61.12-001-86245892-2025 «Бетонные блоки типа «Лего», согласно которым блоки изготавливают из тяжелого бетона по ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые» со следующими характеристиками:

- класс бетона по прочности на сжатие — не менее В20;

- водонепроницаемость — W4;

- морозостойкость — F1 100 по 1-му базовому методу.

В качестве областей применения этих блоков в ТУ указаны:

- зонирование помещений (возведение отсеков и ниш для раздельного хранения, например, сельхозпродукции в пределах одного помещения);

- прочная несъемная опалубка при монолитном строительстве;

- строительство стен и подвалов, внутренних перегородок;

- возведение подпорных стен;

- строительство складских и хозяйственных помещений.

В 2024–2025 гг. на территории АО «Целинсагрохимсервис» (п. Целина Ростовской области) из ЛЕГО-блоков ООО «ТД Минерал» было возведено одноэтажное здание склада для хранения сельхозпродукции (бесподвальное, пятиугольное в плане, с габаритными размерами 96,5×48,5 м) со следующими характеристиками:

- максимальная высота здания — 14,0 м;

- уровень ответственности — нормальный (II);

- степень долговечности — II (не менее 50 лет);

- степень огнестойкости — II;

- площадь застройки — 4347 м².

Сотрудниками и аспирантами кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов (ИГОФ) ДГТУ по заказу АО «Целинсагрохимсервис» выполнялось обследование технического состояния здания (на этапе незавершенного строительства) и научно-техническое сопровождение его строительства. Основной целью Заказчика являлось установление возможности загрузки стен из ЛЕГО-блоков горизонтальными эксплуатационными нагрузками от насыпных и жидких материалов.

Общий вид (отдельные фасады) и элементы конструкций строящегося здания склада приведены на рис. 5.

В рамках обследования было установлено следующее. Конструктивная схема — каркасная: несущие комбинированные колонны (нижняя часть — железобетонные, верхняя — металлические); металлические прогоны и стропильные фермы покрытия. Пространственную жесткость здания обеспечивает совместная работа колонн из блоков LEGO с монолитными сердечниками, монолитного железобетонного пояса на высоте 6,0 м по всему периметру здания и металлических стропильных ферм покрытия.

В связи со сложностью конфигурации здания, наличием большого количества элементов с разной жесткостью, неоднородностью грунтового основания для исследования использован метод конечных элементов, хорошо апробированный при решении аналогичных задач в объемной постановке [19, 20]. Для оценки НДС конструкций от действия сочетаний постоянных и временных нагрузок была разработана трехмерная конечно-элементная модель обследуемого здания. Для построения исходной геометрической модели здания приняты конструктивные решения с размерами элементов, установленными в процессе обмерных работ. Общий вид 3D-модели здания склада показан на рис. 6.



а)



б)



в)

Рис. 5. Обследуемое здание строящегося склада сельхозпродукции с наружными стенами из ЛЕГО-блоков (п. Целина, февраль 2025 г.): а — фасад в осях А–Ж; б — фасад в осях 17–1; в — элементы каркаса

В модели учтены все несущие элементы: колонны, стены, металлические фермы каркаса с точным назначением сечений стержней согласно выполненному обследованию.

На первом этапе моделирования установлена геометрическая изменяемость схемы при существующем конструктивном решении ферм. В этой связи рассмотрено 4 варианта усиления конструкций дополнительными

стержневыми элементами, и рекомендован 1-й вариант усиления — устройство дополнительных стержней-раскосов между нижним поясом ферм и металлическим надколонником, а также устройство дополнительных связей между фермами для повышения общей жесткости каркаса. При этом задавались только постоянные нагрузки, снеговая и ветровая.

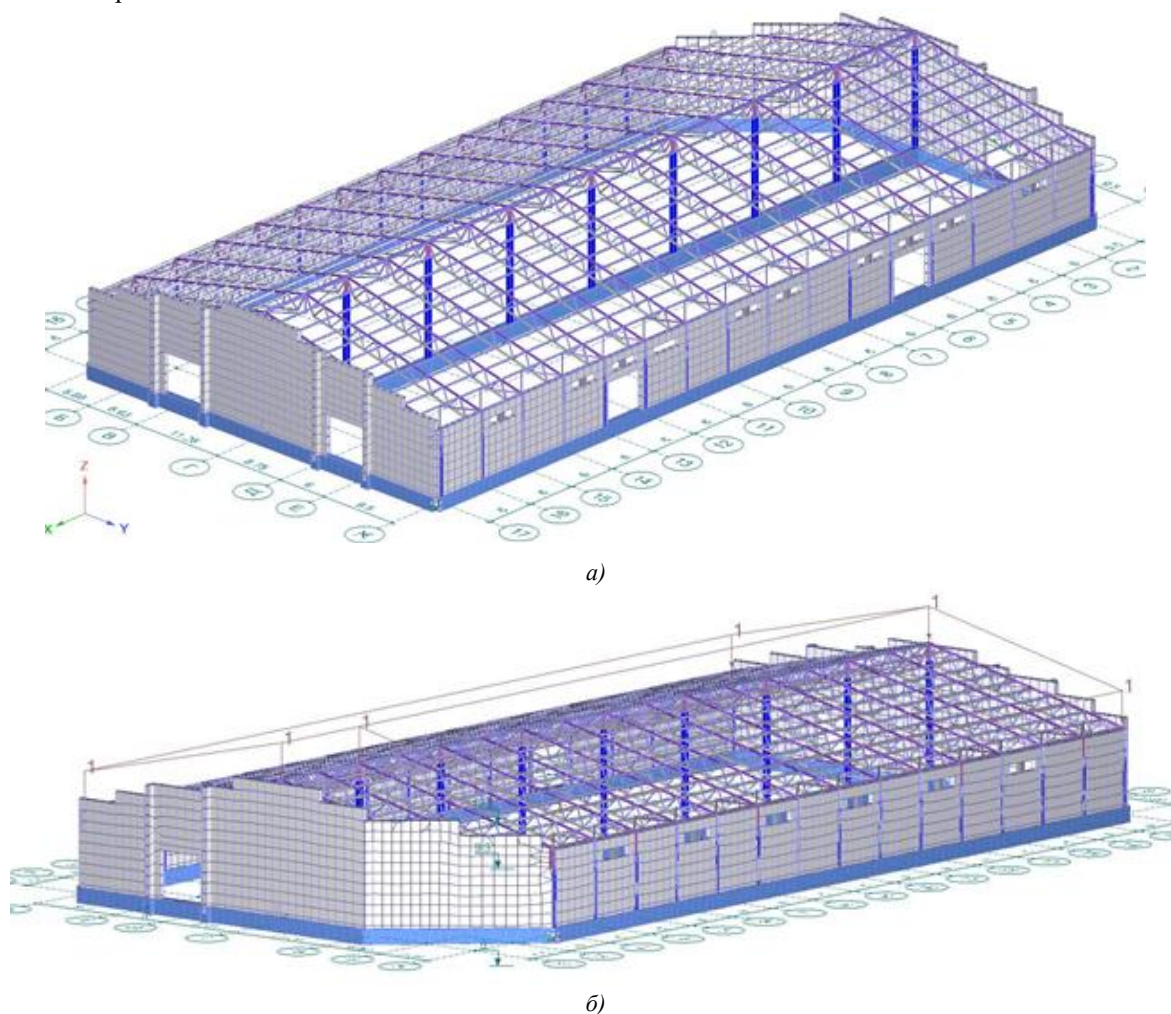


Рис. 6. Общий вид 3D-модели здания: а — вид со стороны фасадов А–Ж и 17–1; б — вид со стороны фасадов Ж–А и 1–17

На 2-м этапе моделирования выполнялась проверка работоспособности и устойчивости конструкции от горизонтальных эксплуатационных нагрузок, в результате чего установлена потеря устойчивости конструкций неармированных стен из ЛЕГО-блоков даже при минимальном загрузении насыпным материалом (зерном).

В связи с невозможностью использования неармированных стен из бетонных ЛЕГО-блоков для восприятия расчетных эксплуатационных нагрузок в рамках научно-технического сотрудничества с АО «Целинскгрохим-сервис» по его заказу сотрудниками кафедры ИГОФ ДГТУ была выполнена научно-исследовательская работа, которая включала:

- изучение положительного и негативного опыта строительства и эксплуатации зданий и сооружений из ЛЕГО-блоков»;
- анализ достоинств и недостатков известных ЛЕГО-блоков, а также построенных из них зданий и сооружений;
- разработку конструктивных решений, направленных на совершенствование ЛЕГО-блоков с целью возможности армирования кладки из данных блоков;
- анализ эксплуатационных нагрузок, действующих на несущие стены от хранения различных материалов и продуктов: жидкого удобрения КАС и зерна;
- разработку компьютерной модели стены из ЛЕГО-блоков в ПК «Лира 10» и оценку напряженно-деформированного состояния при действии различных нагрузок и различной высоте стен;
- разработку рекомендаций по проектированию несущих армированных стен из ЛЕГО-блоков.

Основной целью исследования является научное обоснование и разработка технических решений, позволяющих использовать бетонные ЛЕГО-блоки в несущих конструкциях, воспринимающих горизонтальные эксплуатационные нагрузки.

В связи с возможностью хранения внутри помещений (емкостей) из ЛЕГО-блоков жидких и сыпучих материалов с различной плотностью ρ , т/м³, расчет и подбор армирования кладки из ЛЕГО-блоков выполнялся для стен высотой до 15 м при эксплуатационных нагрузках высотой до 13 м для 2 различных вариантов:

- от веса удобрения КАС-32 ($\rho = 1,32$ т/м³);
- от веса зерна ($\rho = 0,8$ т/м³) с учетом динамических нагрузок от погрузчика.

В результате анализа отечественного [15–18, 23] и зарубежного [21, 22, 24–26] опыта проектирования и строительства зданий и сооружений из ЛЕГО-блоков, созданных в том числе с помощью 3D-печати [24], было установлено, что главным недостатком кладки из таких блоков является ее низкая сопротивляемость горизонтальным (сдвигающим и опрокидывающим) нагрузкам, которые могут возникать при эксплуатации зданий и сооружений, предназначенных для хранения сыпучих и жидких материалов.

В этом случае в кладке возникают растягивающие напряжения, которые приводят к сверхнормативным деформациям и даже полному разрушению таких конструкций, что подтверждается негативным опытом их эксплуатации.

Армирование отдельных блоков позволит повысить прочность каждого блока, но не прочность их соединения между собой.

Таким образом, основным направлением совершенствования кладки из бетонных ЛЕГО-блоков является ее армирование вертикальными арматурными стержнями, соединяющими несколько бетонных блоков по высоте. Такое решение позволяет существенно повысить прочность кладки и создает благоприятные условия для восприятия горизонтальных эксплуатационных нагрузок от веса сыпучих или жидких материалов.

Для возможности армирования кладки в ЛЕГО-блоках при их изготовлении должны быть предусмотрены сплошные вертикальные отверстия, которые могут быть образованы путем размещения в форме извлекаемых стержней или труб заданного диаметра.

При конструировании ЛЕГО-блоков, обеспечивающих возможность их вертикального армирования, важной инженерной задачей является подбор рационального размещения отверстий в блоке. При решении этой задачи нами учитывались следующие факторы:

- геометрические параметры блоков и расстояния в ряду между осями соседних соединений «шип-паз» (250 мм);
- защитный слой бетона до рабочей арматуры, принимаемый согласно таблице 2 ГОСТ 13015-2015 «Изделия бетонные и железобетонные для строительства», от 15 до 35 мм в зависимости от условий эксплуатации конструкций здания;
- распределение напряжений в кладке при действии горизонтальных эксплуатационных нагрузок.

Так как максимальные растягивающие напряжения в кладке от горизонтальных эксплуатационных нагрузок будут возникать в верхних блоках со стороны действия нагрузки (изнутри здания или сооружения), то арматура и соответственно вертикальные отверстия в блоках под нее должны быть смещены в сторону действия нагрузки.

С учетом всех вышеперечисленных факторов предлагаемая конструкция усовершенствованного ЛЕГО-блока предусматривает вертикальные отверстия диаметром 50 мм, расположенные на расстоянии 250 мм друг от друга. Расстояние от оси отверстий до внутренней боковой грани блока — 125 мм, таким образом защитный слой бетона будет составлять $100 \text{ мм} \pm 15 \text{ мм}$.

Пример конструкции такого усовершенствованного ЛЕГО-блока для стандартного типоразмера $500 \times 1500 \times 600$ мм приведен на рис. 7.

Формирование вертикальных отверстий для армирования кладки в блоках других типоразмеров выполняется аналогично приведенному чертежу.

Для разработанных ЛЕГО-блоков выполнен расчет НДС стеновых конструкций и подбор требуемого армирования. Конструкции стен воспринимают два воздействия: собственный вес и боковое давление от полезной нагрузки.

Полезная нагрузка представлена гидростатическим давлением жидкого удобрения КАС-32 либо давлением сыпучей среды — зерна (пшеницы).

Стены выполнены из кладки бетонных ЛЕГО-блоков на цементно-песчаном растворе. Толщина блоков — 500 мм.

Класс бетона, принятый для расчета — В25.

В таблице 1 приведены физико-механические характеристики зерна, принятые для моделирования нагрузок и расчета. Поскольку наиболее невыгодной нагрузкой является нагрузка от пшеницы, принято решение выполнить расчет на воздействие от данного типа сыпучей среды.

Боковое давление на стену от сыпучей среды определяем по формуле:

$$P = \gamma \cdot h \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2),$$

где γ — удельный вес пшеницы, кН/м³; h — высота насыпи, м; φ — угол внутреннего трения, град.

Результаты расчета давления на стену от веса зерна в зависимости от высоты насыпи сведены в таблицу 2.

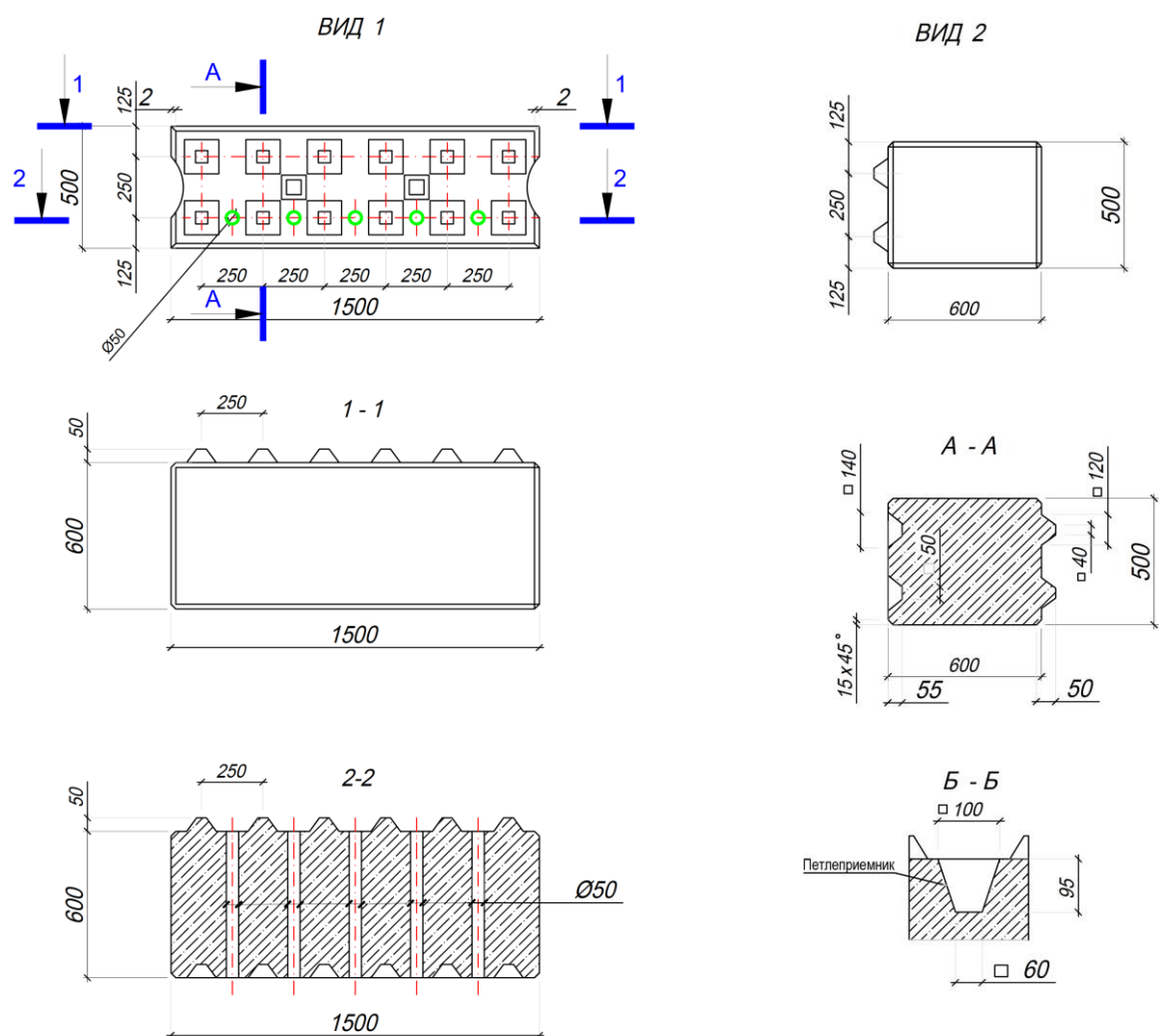


Рис. 7. Конструкция усовершенствованного ЛЕГО-блока для формирования армированной кладки

Таблица 1

Физико-механические характеристики зерна

Зерновой материал	Средний диаметр зерен d , мм	Угол внешнего трения ψ , °	Угол внутреннего трения ϕ , °	Влажность, %	Плотность ρ , кг/м ³
Пшеница	3,8	22,1	17,5	14,4	808
Подсолнечник	5,0	26,6	16,7	14,7	450
Кукуруза	7,1	22,4	18,4	16,6	783
Просо	2,2	20,2	15,1	15,0	770

Таблица 2

Расчетное давление на стену от веса зерна

Высота насыпи, м	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Максимальное давление у нижней грани, кПа	13	17	22	26	30	34	39	43	47	52	56	60	65

Формула для расчета давления от жидкого удобрения КАС-32:

$$P = \gamma \cdot h,$$

где γ — удельный вес жидкого удобрения КАС-32, кН/м³; h — высота гидростатического столба, м.

Результаты расчета давления на стену от жидкого удобрения КАС-32 в зависимости от высоты гидростатического столба сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Давление на стену от КАС-32

Высота гидростатического столба, м	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Максимальное давление у нижней грани, кПа	39,6	52,8	66,0	79,2	92,4	105,6	118,8	132,0	145,2	158,4	171,6	184,8	198,0

Шаг арматуры в блоке — 250 мм с привязкой к внешней грани — 100 мм.

Произведен расчет нагрузок на стены от гидростатического давления удобрения КАС-32 высотой столба жидкости от 3 до 7 м для стен высотой от 3 до 15 м. Сводные результаты максимальных перемещений стены от действия эксплуатационных нагрузок в сравнении с предельно допустимыми перемещения, мм (по таблице Л2 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»), приведены в таблице 4.

Как следует из таблицы 4, высота гидростатического столба жидкости (КАС-32) не должна превышать 6 м. При большей высоте жидкости деформации конструкций превышают допустимые для любой высоты стены (7–15 м). Красным цветом в таблицах 4 и 5 выделены недопустимые по СП 20.13330.2016 значения горизонтальных перемещений.

Таблица 4

Сводная таблица горизонтальных перемещений конструкций стены от действия жидкого удобрения КАС-32

		Максимальные горизонтальные перемещения, мм												
		при высоте конструкции стены, м:												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Высота гидро-статического столба КАС-32, м	3	0,37	0,52	0,67	0,83	0,98	1,13	1,29	1,44	1,59	1,75	1,9	2,05	2,21
	4		1,55	2,04	2,52	3,01	3,49	3,98	4,47	4,95	5,44	5,92	6,41	6,89
	5			4,74	5,93	7,12	8,3	9,49	10,7	11,9	13,1	14,3	15,4	16,6
	6				11,8	14,3	16,7	19,2	21,7	24,1	26,6	29,1	31,5	34
	7					25,6	30,1	34,7	39,3	43,9	48,4	52	57,4	62,2
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (СП 20.13330.2016)		10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	36,7	40	43,3	46,7	50

Произведен расчет нагрузок на стены от бокового давления насыпи зерна высотой от 3 до 9 м для стен высотой от 3 до 15 м. Сводные результаты максимальных перемещений стены от действия эксплуатационных нагрузок в сравнении с предельно допустимыми перемещения, мм (по таблице Л2 СП 20.13330.2016), приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сводная таблица горизонтальных перемещений конструкций стены от действия зерна

		Максимальные горизонтальные перемещения, мм												
		при высоте конструкции стены, м:												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Высота насыпи зерна, м	3	0,15	0,21	0,27	0,33	0,39	0,45	0,51	0,59	0,63	0,69	0,75	0,81	0,87
	4		0,6	0,79	0,97	1,16	1,35	1,54	1,73	1,91	2,1	2,29	2,48	2,66
	5			1,9	2,4	2,9	3,3	3,8	4,3	4,8	5,2	5,7	6,2	6,7
	6				4,7	5,6	6,6	7,6	8,5	9,5	10,5	11,5	12,4	13,4
	7					9,96	11,7	13,5	15,3	17,1	18,9	20,7	22,4	24,2
	8						19,3	22,3	25,3	28,3	31,3	34,4	37,4	40,4
	9							35,4	40,4	45,3	50,2	55,2	60,1	65
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (СП 20.13330.2016)		10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	36,7	40	43,3	46,7	50

Как следует из таблицы 5, высота насыпи зерна не должна превышать 8 м. При большей высоте насыпи зерна деформации конструкций превышают допустимые для любой высоты стены (9–15 м).

В результате моделирования всех возможных сочетаний высоты стены и высоты действия нагрузок от жидкого удобрения КАС-32 и насыпи зерна рассчитаны рекомендуемые параметры армирования кладки, приведенные соответственно в таблицах 6 и 7. В данных таблицах указаны как значения суммарной площади арматуры на 1 п. м. конструкции стены, так и конкретные значения диаметров арматурных стержней, рассчитанные исходя из шага армирования 250 мм (т. е. 4 стержня на 1 п. м.).

Таблица 6

Сводная таблица требуемого армирования у растянутой грани конструкций стены от действия жидкого удобрения КАС-32, см² на 1 п. м. (при шаге 250 мм)

		Требуемые площадь армирования, см ² , и диаметр арматуры, мм												
		при высоте конструкции стены, м:												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Высота гидростатического столба КАС-32, м	3	2,60 Ø10	2,39 Ø10	2,14 Ø10	1,96 Ø8	1,78 Ø8	1,59 Ø8	1,41 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8
	4		7,49 Ø16	7,57 Ø16	7,29 Ø16	7,02 Ø16	6,78 Ø16	6,87 Ø16	6,63 Ø16	6,21 Ø16	6,09 Ø14	5,91 Ø14	5,73 Ø14	5,57 Ø14
	5			17,1 Ø25	16,7 Ø25	17,0 Ø25	16,6 Ø25	16,9 Ø25	16,5 Ø25	16,1 Ø25	16,5 Ø25	16,1 Ø25	15,7 Ø25	15,3 Ø25
	6				35,1 Ø36	33,9 Ø36	35,0 Ø36	34,3 Ø36	33,7 Ø36	34,8 Ø36	34,2 Ø36	33,5 Ø36	34,6 Ø36	34,0 Ø36
	7					62,0	60,9	62,9	61,8	60,7	62,5	61,2	59,9	61,4
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (таблица Л2 СП 20.13330.2016)		10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	36,7	40	43,3	46,7	50

Примечание: исходя из минимального процента армирования, рекомендуется применять стержни диаметром не менее 14 мм.

Таблица 7

Сводная таблица требуемого армирования у растянутой грани конструкций стены от действия зерна, см² на 1 п. м. (при шаге 250 мм)

		Требуемые площадь армирования, см ² , и диаметр арматуры, мм												
		при высоте конструкции стены, м:												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Высота насыпи зерна, м	3	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8
	4		2,21 Ø10	1,94 Ø8	1,76 Ø8	1,57 Ø8	1,4 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8	1,25 Ø8
	5			5,53 Ø14	5,32 Ø14	5,11 Ø14	4,92 Ø14	4,74 Ø14	4,56 Ø14	4,38 Ø12	4,21 Ø12	4,04 Ø12	3,89 Ø12	3,70 Ø12
	6				10,6 Ø20	10,6 Ø20	10,4 Ø20	10,1 Ø18	10,3 Ø20	9,94 Ø18	9,65 Ø18	9,83 Ø18	9,55 Ø18	9,06 Ø18
	7					18,8 Ø25	18,3 Ø25	18,7 Ø25	18,3 Ø25	17,8 Ø25	18,3 Ø25	17,8 Ø25	17,4 Ø25	17,9 Ø25
	8						32,1 Ø32	31,5 Ø32	30,9 Ø32	30,3 Ø32	31,2 Ø32	30,7 Ø32	30,0 Ø32	31,0 Ø32
	9							52,3	51,0	52,3	50,8	52,1	51,4	50,7
Предельно допустимые горизонтальные перемещения, мм (таблица Л2 СП 20.13330.2016)		10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	36,7	40	43,3	46,7	50

Примечание: исходя из минимального процента армирования, рекомендуется применять стержни диаметром не менее 14 мм.

Для соединения арматурных стержней в кладке из блоков «ЛЕГО» рекомендуются следующие возможные соединения (по СП 63:13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции»): муфтовое резьбовое; муфтовое опрессованное; сварное внахлест по ГОСТ 14098-2014 «Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций» (тип С23). Длина стыка арматуры должна приниматься в соответствии с СП 63.13330.2018 и рекомендациями завода-изготовителя муфты.

Заключение. На основе анализа объемно-планировочных и архитектурных решений складских и емкостных зданий и сооружений АПК установлено, что как в отечественной, так и зарубежной практике находят преимущественное применение одноэтажные складские помещения каркасного типа, бункерные (закромные) и силосные (башенные) резервуары. Основной особенностью эксплуатации таких объектов являются изменяющиеся во времени горизонтальные эксплуатационные нагрузки от веса жидкостей или насыпных материалов. Выполненный

анализ достоинств и недостатков существующих сельскохозяйственных складских и емкостных сооружений свидетельствует об актуальности разработки новых высокоэффективных, быстровозводимых, надежных и безопасных в течение всего жизненного цикла конструктивных и технологических решений таких объектов. На примере строящегося здания склада сельхозпродукции в п. Целина Ростовской области выполнено обследование его технического состояния, обмерные работы, изучение инженерно-геологических условий, и разработана математической 3D-модель, на которой исследовано НДС конструкций на действующие нагрузки. В результате моделирования установлено, что кладка из неармированных ЛЕГО-блоков не обеспечивает прочность конструкции даже при минимальной высоте загрузки насыпным или жидким материалом.

Основным направлением совершенствования кладки из бетонных блоков «ЛЕГО» является ее армирование вертикальными арматурными стержнями, соединяющими несколько бетонных блоков по высоте. Такое решение позволяет существенно повысить прочность кладки и создает благоприятные условия для восприятия горизонтальных эксплуатационных нагрузок от веса сыпучих или жидких материалов. В этой связи авторами статьи усовершенствована конструкция бетонных ЛЕГО-блоков, производимых ООО «ТД Минерал» по ТУ 23.61.12-001-86245892-2025 «Бетонные блоки типа «Лего». Предлагаемая конструкция усовершенствованного блока «ЛЕГО» предусматривает вертикальные отверстия диаметром 50 мм, расположенные на расстоянии 250 мм друг от друга. Расстояние от оси отверстий до внутренней боковой грани блока — 125 мм, таким образом защитный слой бетона будет составлять $100 \text{ мм} \pm 15 \text{ мм}$. Блоки в кладке должны ориентироваться армированной стороной в направлении действия горизонтальной эксплуатационной нагрузки со стороны сыпучего или жидкого материала. На математических моделях подобраны рациональные параметры армирования кладки из ЛЕГО-блоков для различных сочетаний высоты склада и высоты сыпучего материала (зерна) или плотной жидкости (удобрение КАС-32).

Представленные в статье результаты могут быть широко использованы при проектировании и строительстве складских и емкостных сооружений АПК, при этом основными достоинствами внедрения предложенных конструктивных решений армированной кладки из ЛЕГО-блоков являются: высокие темпы строительства, технологичность, возможность увеличения горизонтальных нагрузок от сыпучих или жидких материалов на внешние несущие стены, более рациональное использование внутреннего объема помещений и др.

Новое конструктивное решение позволяет армировать ЛЕГО-блоки и строить склады высотой до 10–15 м при засыпке зерном до 8 м или заполнением удобрением КАС-32 на высоту до 6 м. Это существенно расширяет область применения и технико-экономические показатели подобных объектов. Рекомендуемые схемы армирования кладки из ЛЕГО-блоков при рациональных сочетаниях заданных максимальной высоты стен и высоты загрузки складов продукцией позволят оптимизировать затраты на хранение при соблюдении эксплуатационной надежности объекта в течение всего жизненного цикла.

В качестве дальнейшего развития исследований предполагается разработка криволинейных ЛЕГО-блоков для формирования круглых в плане объектов (силосов, бункеров), а также разработка системы мониторинга напряженно-деформированного состояния таких конструкций в течение всего периода эксплуатации.

Список литературы/References

1. Гольденберг Л.И. *Прочность и устойчивость некоторых эффективных типов тонколистовых металлических оболочек*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва; 1990. 356 с.
Goldenberg LI *Strength and Stability of some Effective Types of Thin-Sheet Metal Shells*. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Engineering. Moscow; 1990. 356 p. (In Russ.)
2. Сазанбаев С.К. *Исследование динамики и напряженно-деформированного состояния, совершенствование конструкций навивных металлических силосов*. Дис. ... канд. техн. наук. Ташкент; 1991. 169 с.
Sazanbaev SK *Research of Dynamics and Stress-Strain State, Improvement of Structures of Wound Metal Silos*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Tashkent; 1991. 169 p. (In Russ.)
3. Стрельцов И.В. *Местная устойчивость гофрирования стенки цилиндрических зернохранилищ при сдвиговом воздействии*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва; 1993. 165 с.
Streletsov IV *Local Stability of the Corrugated Walls of Cylindrical Grain Storages under Shear Stress*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Moscow; 1993. 165 p. (In Russ.)
4. Карсункин В.В. *Разработка и исследование комплексных рамно-панельных конструкций производственных зданий сельскохозяйственного назначения*. Дисс. ... канд. техн. наук. Ульяновск; 1998. 122 с.
Karsunkin VV *Development and Research of Complex Frame-Panel Structures of Industrial Buildings for Agricultural Purposes*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Ulyanovsk; 1998. 122 p. (In Russ.)
5. Ращепкин С.В. *Принципы конструирования и экспериментальные исследования новых металлических спиральных силосов*. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов; 2003. 172 с.

Raschepkin SV *Principles of Design and Experimental Studies of New Metal Spiral Silos*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Saratov; 2003. 172 p. (In Russ.)

6. Фейденгольд В.Б. *Методы технологического проектирования и научного обеспечения эффективной эксплуатации заготовительных элеваторов*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва; 2005. 361 с.

Feidengold VB *Methods of Technological Design and Scientific Support of Efficient Operation of Procurement Elevators*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Moscow; 2005. 361 p. (In Russ.)

7. Маркович А.С. *Определение расчётной нагрузки сыпучего материала, действующей на стены цилиндрических силосов, в результате экспериментальных и теоретических исследований*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва; 2013. 193 с.

Markovich AS *Determination of the Design Load of a Bulk Material Acting on the Walls of Cylindrical Silos as a Result of Experimental and Theoretical Studies*. Dissertation for the degree of Candidate of Science in Engineering. Moscow; 2013. 193 p. (In Russ.)

8. Accu-Steel. URL: <https://accusteel.com/> (дата обращения: 25.11.2025).

9. Вайнер И. Строительство и ремонт зернохранилищ. *Комбикорма*. 2015;4:35–38. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/4_15/04_2015_35-38.pdf (дата обращения: 25.11.2025).

10. Юкиш А., Ильина О. Проблемы и пути модернизации зернохранилищ. *Комбикорма*. 2011;4:13–14. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/4_11/4-11_13-14.pdf (дата обращения: 25.11.2025).

Weiner I Construction and Repair of Grain Storages. *Compound Feed*. 2015;4:35–38. (In Russ.) URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/4_15/04_2015_35-38.pdf (accessed: 25.11.2025)

11. Прокопов А.Ю., Виницкий А.Н. Разработка и обоснование метода выравнивания кренов стальных резервуаров гидродомкратами. В: *Материалы национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. 2018»*. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2018. С. 570–572.

Prokopov AYu, Vinitsky AN Development and Substantiation of a Method for Leveling the Rolls of Steel Tanks with Hydraulic Jacks. *Proceedings of the National Scientific and Practical Conference "Relevant Problems of Science and Technology. 2018"*. Rostov-on-Don: DSTU; 2018. P. 570–572. (In Russ.)

12. Прокопов А.Ю., Рай А.Ю., Капралова И.А. О результатах обследования и разработке программы мониторинга технического состояния резервуарного парка морского порта Тамань. В: *Материалы Международной научно-практической конференции «Строительство-2013: Современные проблемы промышленного и гражданского строительства»*. Ростов-на-Дону: РГСУ; 2013. С. 102–104.

Prokopov AYu, Rai AYu, Kapralova IA On the Results of the Survey and the Development of a Program for Monitoring the Technical Condition of the Taman Seaport Tank Farm. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Construction-2013: Modern Problems of Industrial and Civil Engineering"*. Rostov-on-Don: RSSU; 2013. P. 102–104. (In Russ.)

13. Прокопов А.Ю., Акопьян В.Ф., Гаптлисламова К.Н. Изучение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и взаимного влияния подземных конструкций существующих и вновь возводимых сооружений в береговой зоне морского порта Тамань. *Инженерный вестник Дона*. 2013;4(27). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104> (дата обращения: 25.11.2025).

Prokopov AYu, Akopyan VF, Gaptlislamova KN Studying of the Deformed Condition of the Soil Massif and Mutual Influence of Underground Designs of Existing and Again Erected Constructions in a Coastal Zone of Seaport of Taman. *Engineering Journal of Don*. 2013;4(27). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104> (accessed: 25.11.2025) (In Russ.).

14. Прокопов А.Ю., Ткачева К.Э. Исследование напряженно-деформированного состояния фундамента вертикального резервуара с учетом динамики эксплуатационных нагрузок. *Инженерный вестник Дона*. 2015;3(37). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3200> (дата обращения: 25.11.2025).

Prokopov AYu, Tkacheva KE A Study of Stress-Strain State of Foundation of Vertical Vessel Subject to Dynamic Operating Loads. *Engineering Journal of Don*. 2015;3(37). (In Russ.) URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3200> (accessed: 25.11.2025)

15. Сазонов И.С., Арышев Д.Ю. Строительство зданий из ЛЕГО-блоков в условиях Сибири. *Аллея науки*. 2022;5(68):185–189. URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/7May2022/STROITELSTVO%20ZDANIY%20IZ%20LEGO-BLOKOV%20V%20USLOVIYaH%20SIBIRI.pdf (дата обращения: 25.10.2025).

Sazonov IS, Aryshev DYU Construction of Buildings from LEGO Blocks in Siberia. *Alley of Science*. 2022;5(68):185–189. (In Russ.) URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/7May2022/STROITELSTVO%20ZDANIY%20IZ%20LEGO-BLOKOV%20V%20USLOVIYaH%20SIBIRI.pdf (accessed: 25.11.2025)

16. IS GROUP (ООО «ИС ГРУПП»). URL: <https://www.isgmsk.ru/katalog/fundamentnye-bloki-fbs/> (дата обращения: 25.10.2025).

17. ООО «ЖелезобетонИнвест». URL: <https://gbinvest.ru/fb8.html> (дата обращения: 25.10.2025).

Ferroconetoninvest LLC. (In Russ.) URL: <https://gbinvest.ru/fb8.html> (accessed: 25.10.2025)

18. АО «Целинскгрохимсервис». URL: <https://cahs.ru/beton> (дата обращения: 25.10.2025).
JSC Tselinskagrokhimservice. (In Russ.) URL: <https://cahs.ru/beton> (accessed: 25.10.2025)
19. Головатенко Д.В. Прочностной анализ бункерного зернохранилища ёмкостью до 60 тонн в Компас-3D. В: *Материалы пула научно-практических конференций*. Керчь: КГМТУ; 2024. С. 140–145.
Golovatenko DV Strength Analysis of a Bunker Grain Storage with a Capacity of Up to 60 Tons in Compass-3D. *Proceedings of the Pool of Scientific and Practical Conferences*. Kerch: KSSTU; 2024. P. 140–145. (In Russ.)
20. Константинов В.Н. Использование различных вариантов метода конечных элементов для статического и динамического анализа нагрузок на стены башенных зернохранилищ в процессе хранения, загрузки и разгрузки зерна (Испания). *Инженерно-техническое обеспечение АПК*. 2003;1:17.
Konstantinov VN The Use of Various Variants of the Finite Element Method for Static and Dynamic Analysis of Loads on the Walls of Tower Grain Storages during Storage, Loading and Unloading of Grain (Spain). *Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex*. 2003;1:17. (In Russ.)
21. Barhemat R., Mahjoubi S., Li V.C., Bao Yi. Lego-inspired reconfigurable modular blocks for automated construction of engineering structures. *Automation in Construction*. 2022;139:104323. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104323>
22. Bao Yi., Li V.C. Feasibility study of lego-inspired construction with bendable concrete. *Automation in Construction*. 2020;113:103161. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103161>
23. Naumchik I.O. Application of polystyrene lego blocks in construction. В: *Сборник докладов научно-технической конференции «Дни студенческой науки»*. Москва: НИУ МГСУ; 2018. С. 363–365.
Naumchik IO Application of Polystyrene Lego Blocks in Construction. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference "Days of Students' Science"*. Moscow: NRU MSUCE; 2018. P. 363–365. (In Russ.)
24. Baneshi V., Dehghan S.M., Hassanli R. An experimental study on the behavior of interlocking masonry blocks manufactured using 3D printed mold. *Advances in Structural Engineering*. 2023;26(2):360–380. <https://doi.org/10.1177/13694332221126595>
25. Ali M., Gultom R.J., Chouw N. Capacity of innovative interlocking blocks under monotonic loading. *Construction and Building Materials*. 2012;37:812–821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.002>
26. Anand K.B., Ramamurthy K. Development and Performance Evaluation of Interlocking-Block Masonry. *Journal of Architectural Engineering*. 2000;6(2):45–51. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2000\)6:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2000)6:2(45))
27. Yousaf S.M., Gul A., Shahzada Kh., Khan S.W. Evaluation of lateral strength capacity of cored interlocking block masonry piers under variable pre-compression loads. *Structures*. 2024;70:107640. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107640>

Об авторах:

Чжан Юань, аспирант кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9044-1000), kalashnikov1947a1@gmail.com

Прокопов Альберт Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов Донского государственного технического университета (344041, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ResearcherID](https://orcid.org/0009-0001-9044-1000), [ScopusID](https://orcid.org/0009-0001-9044-1000), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9044-1000), prokopov72@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

Чжан Юань: обзор российского и зарубежного опыта применения ЛЕГО-блоков, анализ достоинств и недостатков, разработка вариантов совершенствования конструкций блоков, обследование технического состояния строящегося здания из ЛЕГО-блоков, подготовка исходных данных для моделирования, формулировка выводов и рекомендаций, подготовка текста.

А.Ю. Прокопов: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение моделирования и расчетов, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Zhang Yuan, PhD student of the Department of Engineering Geology, Bases and Foundations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9044-1000), kalashnikov1947a1@gmail.com

Albert Yu. Prokopov, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Engineering Geology, Bases and Foundations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ResearcherID](https://orcid.org/0009-0001-9044-1000), [ScopusID](https://orcid.org/0009-0001-9044-1000), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9044-1000), prokopov72@rambler.ru

Claimed contributorship:

Zhang Yuan: review of Russian and foreign experience in using LEGO-blocks, analysis of advantages and disadvantages, development of options for improving block designs, inspection of the technical condition of a building under construction from LEGO blocks, preparation of initial data for modeling, formulation of the conclusions and recommendations, preparation of the manuscript.

AYu Prokopov: formation of the basic concept, aims of the study, modeling and calculations, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 25.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 06.11.2025

Принята к публикации / Accepted 22.11.2025