

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕСТКИХ СТАЛЬНЫХ БУНКЕРОВ

У статті викладені найбільш важливі положення сучасної концепції проектування жорстких сталевих бункерів як окремого класу будівельних конструкцій. Виділені та проаналізовані її недоліки, а також основні проблеми, які перешкоджають створенню достатньо надійної, довговічної та ремонтпридатної конструкції. Разом з цим авторами наводяться власні рекомендації щодо цих проблем вирішення і намічаються подальші перспективи розвитку теорії бункеробудування.

В статье изложены наиболее важные положения современной концепции проектирования жестких стальных бункеров как отдельного класса строительных конструкций. Выделены и проанализированы ее недостатки, а также основные проблемы, препятствующие созданию достаточно надежной, долговечной и ремонтпригодной конструкции. Наряду с этим авторами приводятся собственные рекомендации по решению этих проблем и намечаются дальнейшие перспективы развития теории бункеростроения.

The paper enlists the most important points of modern designing concept of rigid steel bunkers as a separate class of building structures. Its drawbacks and also the main problems, preventing from creation of a sufficiently reliable, durable and repairable structure, are singled out and analyzed. At the same time, the authors provide their own recommendations as for solution of these problems and outline the further outlook of the bunker-building theory development.

Современные отрасли промышленности и сельского хозяйства используют в различных технологических процессах огромное количество газообразных, жидких и сыпучих материалов. Для их постепенного накопления и хранения были разработаны и созданы соответствующие виды строительных конструкций. В той или иной степени все они представляют собой сосуды, различающиеся по форме и размерам. Так, различные газы принято в промышленных объемах содержать в газгольдерах или ресиверах, для жидкостей применяются резервуары, а сыпучие вещества хранятся в бункерах или силосах. Различие в специфике хранимого вещества приводит к различию требований, предъявляемых к различным видам таких сосудов. В свою очередь, это ведет к различию в их конструктивном исполнении, иногда довольно существенному.

Поскольку все такие конструкции образованы оболочечными структурами, то для их изготовления чаще всего применяется сталь, что позволяет сравнительно просто и эффективно создавать объемные и легкие емкости, обладающие при этом герметичностью и приемлемым уровнем ремонтпригодности.

На протяжении всей истории применения таких емкостей их формы и конструктивные решения постоянно улучшались и видоизменялись параллельно с развитием соответствующей

отрасли хозяйства, приобретая иногда совершенно иное смысловое наполнение. Окончательное их оформление приходится приблизительно на середину прошлого столетия и достаточно подробно и полно отражено в ставшей уже классической работе [1]. В это время методика расчета и технологические возможности по созданию таких емкостей достигли в определенном смысле своих пороговых точек, требовавших для своего дальнейшего совершенствования принципиальных качественных изменений.

В отношении некоторых видов емкостных строительных конструкций (справедливости ради отметим, что их было немало) подобные революционные решения были найдены достаточно легко и быстро. Типичным примером является строительство резервуаров, для которого был предложен способ рулонирования. Большинство же остальных видов стальных емкостных конструкций требовало более принципиального подхода [2].

К числу таких конструкций относятся и стальные бункера. По характеру работы их принято разделять на жесткие и гибкие. Жесткие бункера (рис. 1) практически не изменяют свою форму в процессе загрузки-выгрузки в них сыпучего материала, гибкие же – могут существенно менять очертания своих стенок.

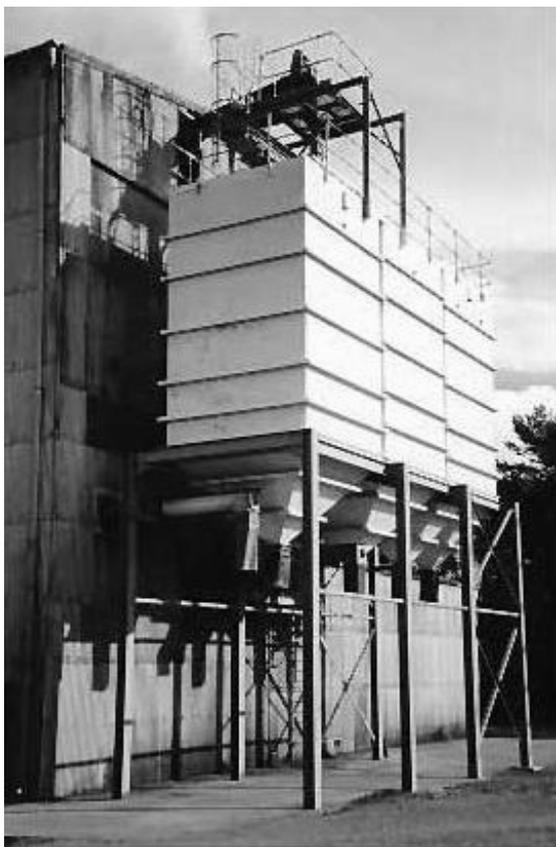


Рис. 1. Общий вид жесткого стального бункера

Работа как гибких, так и жестких стальных бункеров подробно исследовалась многими отечественными и зарубежными учеными, среди которых встречаются и достаточно известные имена – Н. Н. Аистов, Я. М. Хавин, А. Ф. Лилеев, А. П. Ваганов, С. Лурье, Р. Хиггинс, Ф. Мориссон. В недавно изданной работе авторов [3] хронологически изложены основные этапы данного процесса, а также приведены соответствующие авторские комментарии, дающие возможность оценить важность работ того или иного исследователя с современных позиций.

Несмотря на постоянно проявляемый интерес к конструкциям данного класса, стальные бункера в настоящее время остаются одним из наименее изученных видов строительных конструкций, не имеющих собственной стройной и законченной теории проектирования. И если в отношении гибких бункеров работы в данном направлении достаточно продвинулись, что нашло отражение, например, в трудах последних десятилетий проф. Х. Ягофарова [4; 5], то в отношении жестких стальных бункеров такие попытки пока не увенчались успехом.

Современная концепция проектирования жестких стальных бункеров достаточно подробно и полно изложена в работах [6–10]. Од-

нако к настоящему времени она не может считаться завершенной. Ярким свидетельством в пользу этого является то, что спроектированные на ее основе конструкции бункеров довольно быстро приходят в аварийное состояние, особенно при интенсивной эксплуатации в условиях действующего промышленного предприятия (см., например, отчет [11]). Нередки аварии стальных бункеров, зафиксированные в отечественной и зарубежной специальной литературе. В работе [12] авторами настоящей публикации дается их подробная классификация, указываются причины, а также выполняется анализ их специфики и особенностей. Еще одним доводом о несовершенстве применяемой в настоящее время концепции проектирования жестких стальных бункеров является то, что, как явствует из анализа истории ее становления (см., например, [3]), она не претерпевала принципиальных изменений на протяжении всего своего существования, а это более чем сто лет.

По мнению авторов настоящей статьи, такая ситуация связана с тем, что процесс проектирования стальных бункеров затрагивает исключительно сложные вопросы, которые на сегодняшнем этапе пока еще не имеют приемлемого теоретического решения. Стремясь создать простой, понятный инженерам, метод расчета и конструирования жестких стальных бункеров, многие исследователи допускают слишком серьезное упрощение ситуации, не вдаваясь в детальное изучение рассматриваемых вопросов. Поэтому в каждом из предлагаемых подходов оказывается довольно велика доля упрощений и предположений, встречается даже и откровенное догматическое назначение недостающих по смыслу положений. В результате создается завуалированное, искаженное представление о работе сооружения, выливающееся в создание неоправданных прочностных резервов, иногда довольно значительных, либо ведущее к возникновению недопустимо больших напряжений и деформаций в конструкции, вплоть до разрушающих.

Таким образом, одним из актуальных вопросов в области современной теории расчета строительных конструкций является качественное улучшение существующей концепции проектирования жестких стальных бункеров. Возможным путем его решения и посвящается данная статья. Ее основной целью авторы считают анализ современной концепции проектирования жестких стальных бункеров, выявление ее недостатков, а также основных проблем,

препятствующих созданию достаточно надежной, долговечной и ремонтпригодной конструкции бункера указанного типа, и формулирование собственных рекомендаций по их преодолению. Проведение такого анализа будем сопровождать по мере необходимости кратким изложением существа основных положений указанной выше концепции.

Анализируя накопленные на настоящем этапе данные, авторы выделили шесть основных проблемных вопросов, решение которых позволит коренным образом пересмотреть современную концепцию проектирования жестких стальных емкостей для сыпучих материалов.

Как и при проектировании любой строительной конструкции, проектирование жесткого стального бункера начинается с выбора его формы и назначения основных геометрических размеров. Именно в этом заключается первая проблема.

К настоящему времени сложившаяся конструктивная форма стального бункера представляет собой емкость, состоящую из двух основных соединенных между собой частей: верхней вертикальной части, формирующей необходимый запас сыпучего материала, и нижней части (воронки), предназначенной для облегчения его выгрузки. Загрузка хранимого сыпучего осуществляется через верхнее загрузочное отверстие в сооружении, а разгрузка – через выпускное отверстие, расположенное в нижней части воронки (рис. 2). Форма обеих частей может быть круглой, квадратной либо прямоугольной в плане. Вся конструкция, как правило, поддерживается колоннами, расположенными по периметру воронки, хотя иногда применяется и подвесная схема работы, при которой сооружение подвешивается с помощью балок или стержневых элементов к вышестоящим опорным конструкциям.

Уже на данном этапе достаточно проблематичным является вопрос о выборе формы будущей конструкции. Как правило, круглые в плане емкости применяются при развитой вертикальной части конструкции, а квадратные и прямоугольные – при ее небольшой высоте. Однако какие-либо исследования, подтверждающие или опровергающие сложившиеся традиционные представления по данному вопросу, авторам не известны.

Между тем, как известно из математических соображений, круг всегда имеет при одинаковой с квадратом площади меньший периметр. Это означает, что бункер круглой в плане фор-

мы будет иметь меньшую боковую поверхность, чем бункер такого же объема, но имеющий в плане квадратную форму. По данным авторов, эта величина составляет около 12 %.

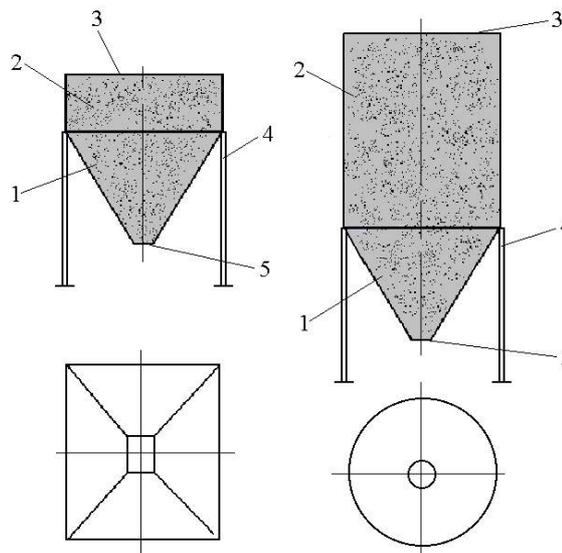


Рис. 2. Принципиальная схема бункера:
1 – воронка; 2 – вертикальная часть; 3 – загрузочное отверстие; 4 – опорная колонна; 5 – выпускное отверстие

Однако распространенное в практике строительства группирование бункерных емкостей приводит в случае выбора круглой формы к неэкономичному использованию образующегося межбункерного объема. К тому же изготовление стальных поверхностей, имеющих пространственную кривизну, дополнительно требует выполнения технологической операции вальцовки плоских листов.

Поэтому учет всех перечисленных факторов представляет собой многопараметрическую задачу, однозначное решение которой в настоящее время не предложено.

Между тем, вопрос о выборе формы для конструкции жесткого стального бункера является исключительно важным, поскольку согласно современной концепции проектирования таких конструкций имеется принципиальнейшее различие в методах дальнейшего расчета круглой и прямоугольной в плане емкости.

К тому же отечественная школа предполагает наличие двух видов емкостей для сыпучих материалов: с невысокой вертикальной частью, называемых бункерами, и высокой – силосами. Количественная граница между ними, установленная новыми нормами Украины [6], составляет величину $1,5A$ (где A – площадь горизонтального сечения емкости в уровне соединения вертикальной части с воронкой). Заметим, что эта величина различна по данным справочных

источников (подробнее см., например, работу [13]).

Как и в предыдущем случае, данный аспект, на первый взгляд, не оказывает непосредственного влияния на процесс дальнейшего проектирования конструкции бункера, но при детальном анализе выясняется, что в зависимости от выбранной конструктивной формы применяются совершенно различные методы расчета, основанные, подчас, на взаимно противоречивых положениях. Добавим, что никакого теоретического обоснования установленного разграничения авторам не известно.

Таким образом, в современной концепции фактически утрачивается целостность подхода к проектированию стальных емкостей для сыпучих материалов, что на практике приводит к определенным трудностям уже в самом начале их создания.

Зарубежная европейская нормативно-справочная литература по данному вопросу [14] количественно не разграничивает понятия бункер (bunker) и силос (silo). Они употребляются параллельно и объединяются понятием bins, которые могут быть «приземистые» (squat), что ближе к принятому понятию бункера, или «стройные» (slender), что практически соответствует понятию силоса в русскоязычной литературе. Американская нормативно-справочная литература [15] также использует единственный термин «bins».

Следующий, второй, проблемный вопрос связан с назначением размеров конструкции бункера. Имеющиеся в настоящее время рекомендации на сей счет носят кусочный характер и, как правило, не имеют под собой глубокого теоретического обоснования. Не приводятся также сведения о выборе оптимальных соотношений между отдельными частями бункера. Имеющиеся отрывочные исследования данного вопроса (см., например, [16]) свидетельствуют о том, что даже среди применяемых конструктивных форм можно выделить наиболее рациональные с точки зрения минимума поверхности бункера или соотношения жесткостей его отдельных частей. Однако целостное изложение данного вопроса отсутствует.

Таким образом, следует признать, что вопросы назначения размеров конструкции жестких стальных бункеров, а также выбора их рациональной и эффективной геометрической формы разработаны в настоящее время недостаточно. В связи с этим авторами настоящей статьи проводятся активные исследования в данном направлении.

Следующим этапом при проектировании конструкции является сбор нагрузок. При расчете многих типов строительных конструкций он не представляет серьезных затруднений, поскольку достаточно подробно и полно исследован специалистами и зафиксирован в соответствующих нормативных документах.

В отношении жестких стальных бункеров, основной технологической нагрузкой для которых является вес загруженного сыпучего материала, определение величины и характера нагрузок является третьим проблемным вопросом.

Его решение упирается в известную неопределенность задачи нахождения распределения давления сыпучего материала на стенку в замкнутом сосуде переменного объема. Свою долю неопределенности вносит и поведение сыпучего при его истечении из такого сосуда. Кроме этого, в настоящее время недостаточно исследован сам спектр возможных воздействий загружаемого материала на конструкцию. Так, неясно, например, какое влияние на распределение давления оказывает сегрегация сыпучего, его деградация и консолидация.

Отечественная концепция проектирования рекомендует использовать теорию предельного равновесия В. Ренкина. Она представляет собой частный случай теории Ш. Кулона применительно к подпорным стенам и неограниченному массиву грунта, без учета сил трения материала о стенки бункера. Статическое давление сыпучего при этом на определенной глубине от горизонта засыпки раскладывается на две составляющие – нормальную, действующую перпендикулярно поверхности стенки, и касательную, действующую вдоль ее поверхности. Расчетные значения их принимаются линейно зависящими от глубины.

В международной практике преимущество отдается определению давления сыпучего по теории Г. А. Янсена с учетом трения материала о стенки бункера (как для силосов в отечественных рекомендациях), хотя предыдущий подход также используется. Эпюра давления при этом имеет нелинейный вид – давление асимптотически стремится к некоторой постоянной величине. Его значение получается намного меньше соответствующего значения, рассчитанного по теории В. Ренкина, в особенности для глубоких емкостей.

В целом практика эксплуатации стальных емкостей для сыпучих материалов показала, что для невысоких бункеров реальные значения давления находятся между определяемыми по

двум указанным выше теориям, а характер их распределения ближе к теории Г. А. Янсена. Установлено также, что давление сыпучего следует определять дифференцированно для случаев состояния покоя, загрузки и выгрузки. Так, величины нормального давления при загрузке и в состоянии покоя равны, а при разгрузке ниже определяемых по теории Г. А. Янсена; величина же касательного давления при загрузке ниже соответствующей величины в состоянии покоя, определяемых формулой Г. А. Янсена, а при разгрузке существенно возрастает. Эти особенности уже нашли отражение в новых Европейских нормах и учитываются введением целого ряда специальных поправочных коэффициентов.

В этих случаях, как и при определении геометрии конструкции бункера, утрачивается целостность подхода. В этой связи авторы предлагают использовать специально разработанную Л. В. Гячевым теорию давления сыпучих материалов в сосудах типа бункера [17]. Она имеет достаточное экспериментальное обоснование и позволяет с единых теоретических позиций рассматривать процессы статического и динамического поведения сыпучего материала и объяснить такие сложные эффекты, как разрыхление сыпучего вблизи выпускного отверстия или образование сводов внутри емкости.

По мнению авторов, применение данных результатов позволяет открыть перспективы для аналитического описания работы конструкции бункера, являющегося четвертым наиболее сложным и значимым проблемным вопросом в современной концепции проектирования жестких стальных бункеров.

Применяющийся в настоящее время и в отечественной, и в зарубежной проектной практике подход к расчету бункеров предполагает разделение единой пространственной конструкции на отдельные простые элементы с последующим расчетом каждого из них по плоским, во многом упрощенным расчетным схемам, а также осуществление обратного, синтетического перехода к цельной системе на стадии конструирования без какого-либо учета взаимного влияния различных структурных элементов друг на друга.

В соответствии со сложившейся конструктивной схемой (рис. 3) принято выделять три таких элемента: ребро жесткости с примыкающей к нему частью стенки, фрагмент стенки на участке между соседними ребрами жесткости и бункерную балку как наиболее частую конструктивную форму вертикальной части.

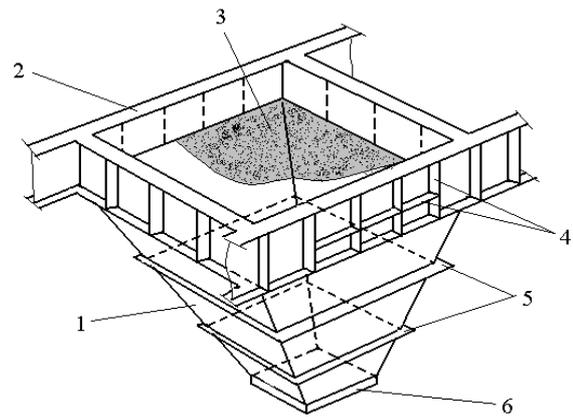


Рис. 3. Конструктивная схема жесткого стального бункера:

- 1 – пирамидальная часть (воронка); 2 – призматическая часть (бункерная балка); 3 – внутренняя футеровка стенок; 4 – ребра жесткости бункерной балки;
- 5 – горизонтальные ребра жесткости воронки;
- 6 – выпускное отверстие

По своим геометрическим размерам бункер не относится к разряду протяженных конструкций, в которых возможно выделить определенную часть, рассчитываемую в дальнейшем как плоскую систему. Поэтому такой подход в классическом его понимании не может быть с абсолютной достоверностью применен в данном случае.

Решение вопроса об определении давления на стенки конструкции бункера позволяет применить для выяснения характера напряженно-деформированного состояния с высокой степенью достоверности один из современных численных методов вычислительно математики – метод конечных элементов. Основные результаты, полученный авторами при этом, изложены в их работах [3; 18–20].

Пятый проблемный вопрос современной концепции проектирования жестких стальных бункеров связан с необходимостью изменения существующего конструктивного решения таких емкостей в сторону повышения их долговечности и ремонтпригодности. Как видно из рис. 3, конструктивно стенки вертикальной части и воронки образованы стальными листами относительно небольшой толщины (4...16 мм), формирующими обшивку бункера, которые для возможности восприятия давления от сыпучего материала подкрепляются ребрами жесткости из уголков или тавров. С внутренней стороны стенки бункера футеруются для предупреждения их абразивного износа сыпучим материалом при его загрузке-выгрузке и температурного перегрева, если загружаемый материал нагрет. В практике применяют самые разнообраз-

ные типы футеровки, начиная от самофутеровки и заканчивая постановкой специальных многослойных пакетов противоударного типа.

Все элементы конструкции стального бункера соединяются сваркой, что приводит к исключительно большой общей протяженности сварных швов. Кроме этого, ребра жесткости создают дополнительные поверхности, способствующие развитию очагов интенсивной коррозии в условиях действующего промышленного предприятия, особенно при работе с сыпучими материалами, способными выделять сернистые соединения. Еще одним недостатком существующего конструктивного решения такого типа емкостей является их невысокая ремонтпригодность, связанная с необходимостью в случае проведения обследований либо ремонтных работ проводить работы и по откреплению и обратному прикреплению элементов футеровки. Исключительно неудобно при значительных габаритах конструкции довольно точно выполнять состыковку отдельных ее частей и элементов друг с другом.

Работа над устранением этих, а также ряда других более мелких недостатков систематически проводится авторами настоящей статьи.

И последний, шестой проблемный вопрос связан с недостаточной изученностью особенностей реальной эксплуатации стальных бункеров. К настоящему времени накоплено очень незначительное количество информации, особенно задокументированной, касающейся хотя бы наиболее важных аспектов работы конструкций такого типа. К ним относятся данные о периодичности и интенсивности загрузки применительно к различным отраслям промышленности и сельского хозяйства, необходимые для оценки усталостной прочности конструкции, данные об интенсивности износа футеровки и элементов бункера, в первую очередь коррозионного, а также данные об имеющих место в практике эксплуатации динамических воздействиях на конструкцию бункера, по типу ударных или вибрационных, которые позволили бы разработать мероприятия по снижению металлоемкости и повышению надежности жестких стальных бункеров.

Таким образом, выделены шесть основных проблемных вопросов современной концепции проектирования жестких стальных бункеров и в более широком понимании – емкостей для сыпучих материалов. Конечно, все они не являются изолированными, а теснейшим образом взаимосвязаны и взаимозависимы. Распутывание этого проблемного клубка должно быть прове-

дено не на основе решения отдельных частных задач расчета и конструирования стальных бункеров с копированием и заимствованиями решений из соседних областей теории строительных конструкций, а на основе детального и всестороннего изучения всех специфических особенностей бункера и дальнейшего учета всего перечисленного выше набора вопросов и задач при их обобщении и систематизации. Только такой подход, по мнению авторов, позволит создать единую целостную теорию формообразования жестких стальных бункеров.

В заключение отметим, что авторы настоящей статьи в течение ряда лет занимаются разработкой затронутой тематики и полученные ими результаты подтверждают правильность выбранной концепции работы. По их мнению, дальнейшая разработка подобной теории формообразования бункеров позволила бы получить не только серьезный экономический эффект, но и дала бы возможность создавать более безопасные сооружения, что намного важнее.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лессиг Е. И., Лилеев А. Ф., Соколов А. Г. Листовые металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1970. – 488 с.
2. Развитие металлических конструкций: Работы школы Н. С. Стрелецкого / В. В. Кузнецов, Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий и др. – М.: Стройиздат, 1987. – 576 с.
3. Банников Д. О., Казакевич М. И. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов. – Д.: Наука и образование, 2003. – 150 с.
4. Ягофаров Х. Гибкие бункера. – М.: Стройиздат, 1980. – 168 с.
5. Ягофаров Х. Стальные бункера как пространственные системы: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Уральская госуд. акад. путей сообщ. – Екатеринбург, 1998. – 47 с.
6. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна. – Введ. 01.07.98. – Вид. офіц. – К.: Держбуд України, 1988. – 41 с. – Укр. та рос. мовами.
7. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. – Введ. 01.01.87. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
8. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
9. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. Д. А. Коршунова. – К.: Будівельник, 1988. – 352 с.
10. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: В 3 т. / Под ред. В. В. Кузнецова

- ва. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 526 с.
11. Криворожский государственный горно-металлургический комбинат «Криворожсталь». Доменная печь № 9. Бункерная эстакада. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций: Отчет о НИР, в 3 т. / ОАО «Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция». – Д., 1997.
 12. Bannikov D., Kazakevitch M. Features of Failures of Steel Bunkers (of pyramidally-prismatic type) // Proc. of 10th Polish-Ukrainian sem. «Theoretical Foundations of Civil Engineering». – Warsaw (Poland), 2002. – Vol. II. – P. 650–657.
 13. Ягофаров Х. Стальной пирамидально-призматический бункер как пространственная система: Приложение к дис... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Уральская госуд. акад. путей сообщ. – Екатеринбург: УрГАПС, 1998. – 315 с. (рукопись).
 14. ENV 1991-4. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions in silos and tanks. – CEN, 1994.
 15. Structural Engineering Handbook / Edited by Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer. – 4th ed. – McGraw-Hill, 1997. – 624 p.
 16. Ягофаров Х. Размеры пирамидально-призматического бункера минимального объема // Изв. вузов. Сер. стр-во. – 1997. – № 2. – С. 114–116.
 17. Гячев Л. В. Основы теории бункеров. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 312 с.
 18. Казакевич М. И., Кострица С. А., Банников Д. О. Эффективность расположения горизонтальных ребер жесткости бункеров // Сб. научн. работ: Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве. Строительство. – Д.: Арт-Пресс. – 1998. – Вып. 5. – С. 98–104.
 19. Банников Д. О., Кострица С. А. Анализ напряженно-деформированного состояния стального пирамидального бункера // Proc. of 6th Polish-Ukrainian sem. «Theoretical Foundations of Civil Engineering» - Warsaw (Poland). – 1998. – P. 409–414.
 20. Банников Д. О. Прочностные и динамические свойства пирамидально-призматических бункеров для сыпучих материалов // Вісник ДонДАБА: Композиційні матеріали для будівництва. – Макіївка: ДонДАБА. – 2001. – Вип. 2001-1(26). – С. 116–121.

Поступила в редколлегия 16.10.03.