

УДК 624.042.2

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/mech/mdsb/1042.html>

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ, ПРИМЕНЯЕМОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Т.Р. Гафаров

gafarovtr@student.bmstu.ru

Б.Р. Гафаров

gafarovbr@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Современные агропромышленные комплексы требуют эффективных решений для систем малообъемных производств. В высоко конкурентной среде это обусловлено необходимостью повышения производительности, снижения затрат и обеспечения стабильной работы в процессе эксплуатации. В статье проанализированы существующие решения модульных систем, выполнено сравнение различных параметров (типов соединений, материалов конструкции, толщин материалов, цены), проведен расчет конструкций. В результате работы установлено, что разборные конструкции наиболее выгодны и просты в эксплуатации, а также построены зависимости максимальных деформаций и максимальных напряжений от параметров модульной системы, что позволило выбрать наиболее подходящие габариты системы.

Ключевые слова: модульная система, агропромышленный комплекс, малообъемное производство, оптимизационный расчет, проектирование системы, ANSYS, статический расчет

Введение. Важно спроектировать систему малообъемного производства так, чтобы ее было удобно использовать в различных условиях. Современные ЭВМ и методы инженерных расчетов позволяют моделировать условия эксплуатации, благодаря чему можно минимизировать деформации и напряжения в системе при оптимальном использовании материала. В условиях высоко конкурентной среды это наиболее актуально. Цель исследования — провести оптимизационный расчет систем и выделить лучшие варианты. Задачи: проанализировать существующие решения модульных систем, описать преимущества применения различных материалов, создать трехмерные модели систем, выполнить расчеты на прочность и перемещения методом конечных элементов, проанализировать результаты расчетов и выделить наилучшие варианты конструкции.

Обзор тенденций. Модульные системы применяются в различных сферах промышленности. Благодаря модульности можно добиваться снижения массы конструкции, легкости замены ее отдельных частей, хорошей масштабируемости, использования унифицированных элементов заводского изгото-

товления. Например, компания «БК-Ресурс», занимающаяся строительством, установила, что сроки строительства жилых зданий, детских садов и торговых центров при применении модульных технологий вместо традиционных методов строительства сокращаются более чем в 2 раза [1]. С применением модульных систем затраты на строительство снижаются примерно на 10...30 %, при этом коэффициент мобильности модульных зданий составляет 0,8...0,9 против 0,2...0,3 для капитальных. Это значит, что модульные системы подходят как для постоянной, так и для временной эксплуатации с возможностью последующего демонтажа и переноса.

Успешный опыт применения модульных систем в строительстве и причины успеха позволяют предположить, что для агропромышленного комплекса похожие методы построения хранилищ позволяют также уменьшить затраты, время на ввод систем в эксплуатацию и выделиться на фоне конкурентов.

Описание системы. Система должна представлять собой конструкцию, внешне напоминающую шкаф, в нижней части которого будет располагаться электроника, а на верхних полках — место для выращивания культур. Ее можно применять как в малых масштабах (например, в домашних условиях), так и в промышленных (в складских помещениях). Система будет обеспечивать автоматический полив культур и другие необходимые условия (температуру, влажность, давление) для выращивания растений методом капельного полива. В программном обеспечении планируется использовать технологии беспроводной передачи данных, в том числе Wi-Fi, Bluetooth, Bluetooth Low Energy и др., что даст пользователям возможность удаленно управлять системой.

Методы моделирования и расчета. Для качественного оптимизационного расчета в исследовании применены современные методы инженерных расчетов. Для трехмерного моделирования выбрана CAD-система «Компас-3D». Для моделирования условий эксплуатации и расчета применяется метод конечных элементов и его интерпретация в системе проектирования ANSYS.

Анализ материалов. Прежде чем проводить расчеты, определимся с материалом на основе его характеристик. Рассмотрим несколько наиболее часто используемых вариантов: сталь, алюминий и его сплавы, композитные материалы. Выбор будем осуществлять на основе следующих характеристик: цена, масса, прочность, коррозионная стойкость и теплопроводность. Требования к массе и прочности обусловлены легкостью сборки и транспортировки, а также возможностью выдерживать нагрузки при экономичном использовании материалов. Требования к коррозионной стойкости и теплопроводности обусловлены тем, что работа будет осуществляться в промышленных услови-

ях с большой влажностью и необходимостью поддерживать постоянную температуру [2]. Также следует учитывать внешние воздействия в виде агрессивных химических веществ (удобрений, пестицидов) [3].

Для наглядности вынесем характеристики материалов в таблицу.

Сравнение материалов

Параметр	Конструкционная сталь	Композитные материалы	Чистый алюминий (1xxx)	Алюминиевый сплав 6061
Цена за м ² (толщина 1 мм), руб.	1000–1500	3000–10000	2500–4000	3500–5000
Масса*, кг/м ² , при толщине 1 мм	7,85	1,5–2,5	2,7	2,7
Прочность, МПа	250–400	200–500	50–100	250–350
Коррозионная стойкость	Низкая (без покрытия)	Высокая	Очень высокая	Высокая
Теплопроводность*, Вт/(м · К)	50	0,3–1,5	235	167
* Приведенные значения величин являются усредненными.				

Проанализировав таблицу, выберем наиболее подходящий материал. Видно, что конструкционная сталь имеет заметно более низкую цену по сравнению со своими конкурентами, при этом у нее высокая прочность, но большая масса. Низкую коррозионную стойкость можно компенсировать покрытием антикоррозионной краской.

Главными преимуществами композитных материалов, алюминия и его сплавов являются их масса и высокая коррозионная стойкость без дополнительной обработки.

Учитывая условия эксплуатации, можно считать, что немного бóльшая масса — не ключевой параметр выбора материала, куда более значимым в рассматриваемой ситуации является стоимость системы. Несмотря на незначительные недостатки конструкционной стали, она имеет значительно более низкую цену и бóльшую доступность, что в данном случае служит наиболее весомыми аргументами в пользу ее выбора в качестве основного материала для системы. Покраска же, решающая проблему с коррозией, лишь незначительно увеличивает стоимость системы.

Силовой расчет. Определившись с материалом, перейдем к построению моделей и расчетам. Приведем рассуждения, на основе которых определимся

с условиями нагрузки системы. Основными способами крепления между собой стальных деталей являются сварное, болтовое и стержневое соединения. Силовые нагрузки вычислим на основе массовой нагрузки, которая будет приложена на каждый элемент модульной системы. Значения плотности почвы изменяются в пределах от 0,4 до 1,8 г/см³ и зависят от механического состава, количества органического вещества и структуры почвы. Оптимальная плотность для большинства культур равна 1,0...1,2 г/см³ [4]. С учетом воды, необходимой для полива растений, которая повышает плотность почвы, примем значение плотности равным 2 г/см³. Габариты полки примем равными 70 × 70 см, а высоту почвенного слоя — 10 см. Таким образом, максимальная масса нагрузки на одну полку будет составлять примерно $70 \times 70 \times 10 \text{ см}^3 \times 2 \text{ г/см}^3 = 49 \text{ кг}$. Климатические условия заключаются в повышенной влажности и смене температуры в диапазоне от -40 °С до +50 °С. При заданных нагрузках необходимо будет минимизировать деформации и массу шкафа для упрощения транспортировки и монтажа, а также обеспечить надежность креплений.

В ходе силового расчета параметрами будут выступать толщины полок и тип соединений. Примем следующие ограничения: максимальная допустимая деформация полок — 1,5 мм, конструкция должна выдерживать нагрузку массой до 50 кг на каждую полку, а общая масса шкафа не должна превышать 60 кг для упрощения транспортировки и легкости сборки.

Алгоритм расчета и анализа будет следующим: построение базовых моделей — анализ нагрузок — сравнение типов соединений — оптимизация толщины полок — итоговый анализ.

Для построения базовых модели опишем три типа соединений. Все типы модульных шкафов обладают габаритами, указанными на рис. 1.

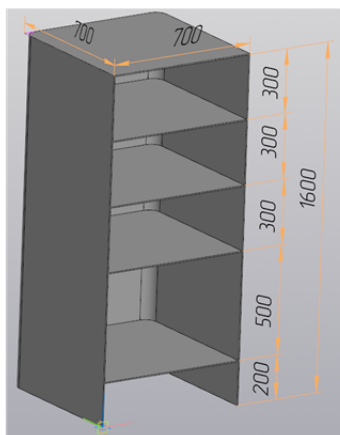


Рис. 1. Габариты установки

Шкаф с использованием сварных соединений планируется сварить из листов металла конструкционной стали. Толщина полок будет варьироваться от 1,2 до 3,0 мм с шагом 0,2 мм, что позволит подобрать оптимальную толщину полок по прочности и массовым характеристикам. У сварной конструкции есть ряд достоинств: высокая прочность соединений, отсутствие подвижных частей, устойчивость к вибрациям и дополнительным нагрузкам, простота в изготовлении при наличии сварочного оборудования [5]. Но также существуют и недостатки: отсутствие модульности кон-

струкции (невозможно разобрать шкаф для транспортировки), необходимость высокого качества сварки для предотвращения деформаций и трещин. Шкаф с применением болтовых соединений также выполнен из конструкционной стали. Размеры используемых болтов будут зависеть от размеров труб.

Основными достоинствами шкафа, собранного с помощью болтовых соединений, являются удобство транспортировки и возможность быстрой замены дефектных частей. Его недостатки — отсутствие герметичности и меньшая прочность. Тем не менее приведенные далее расчеты показывают достаточный уровень прочности, а термоизоляцию можно осуществить с помощью дополнительных подкладок.

Вариант конструкции с использованием стержней вместо болтов имеет схожие достоинства и недостатки по сравнению с болтовым вариантом, однако имеет большую площадь опоры для полок, что позволяет уменьшить деформацию полок при незначительном увеличении массы. При этом у конструкции остаются те же преимущества, связанные с транспортировкой и вариативностью сборки.

Для исследования в системе «Компас-3D» были разработаны три варианта конструкции шкафа (сварные, болтовые и стержневые соединения) [6]. Также были использованы различные параметры толщины полок и размеров труб.

Задание граничных условий. Для всех видов соединений симитирована нагрузка в 500 Н (50 кг) на каждую полку. Также для расчетов в системе ANSYS были закреплены основания (Fixed Support) различных версий модульных систем. Это допустимо, поскольку в сварной конструкции относительное перемещение стенок отсутствует полностью, а в болтовой и стержневой конструкциях перемещения довольно легко предотвратить следующими способами: применением подпятников для увеличения площади контакта с полом (подпятники можно установить благодаря отверстиям в трубах); использованием поперечных перекладин или подвязок; регулированием высоты ножек для компенсации неровностей пола; применением антивибрационных опор (например, резиновых ножек для увеличения сцепления с поверхностью); снижением положения центра тяжести благодаря размещению оборудования и аккумуляторов в нижней части шкафа; креплением конструкции к стене или полу. Все способы, кроме последнего, крайне доступны, удобны, недороги и быстры в реализации [7]. Таким образом, из трех вариантов конструкции наиболее предпочтительным остается стержневое соединение, хотя также допустимо использовать болтовое соединение.

Для анализа используется конструкционная сталь (Structural Steel) со следующими характеристиками: модуль упругости $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 250$ МПа [8].

Расчет оптимальной толщины полок. Рассчитаем оптимальную толщину полок конструкции. Построим модели для каждого из вариантов и рассчитаем их с помощью системы ANSYS. В итоге получим результаты, представленные на рис. 2, 3.

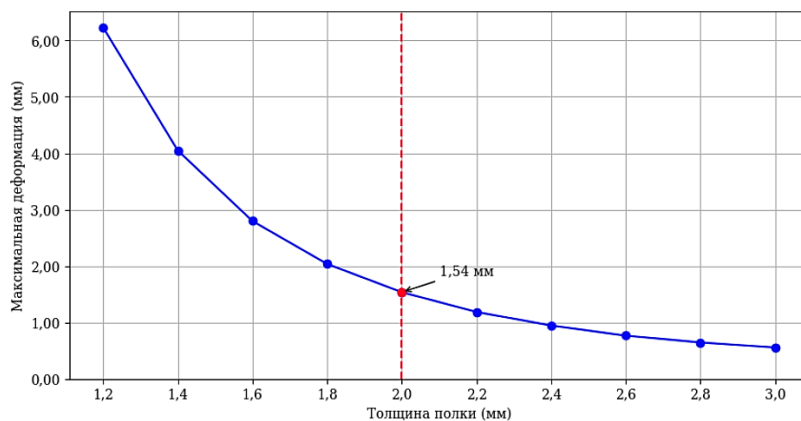


Рис. 2. Зависимость максимальной деформации в полках от толщины полки

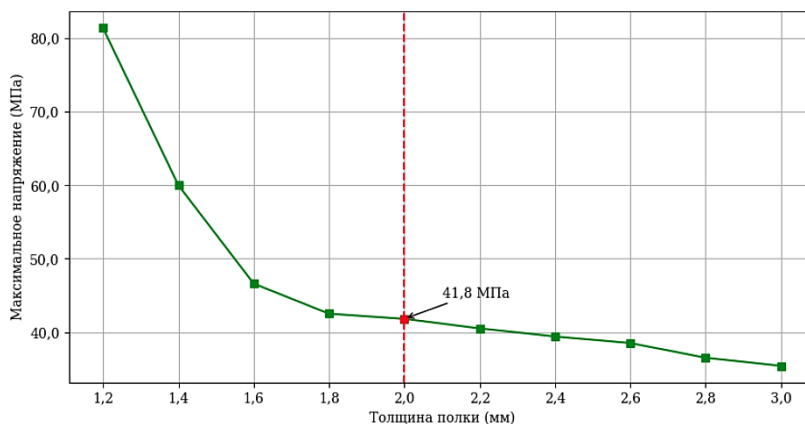


Рис. 3. Зависимость максимального напряжения в полках от толщины полки

Анализируя эти графики и приведенную выше таблицу, можно выбрать оптимальную ширину полок модульной системы. При выборе меньшей толщины деформация полок получается недопустимо большой — до 6 мм при толщине полок 1,2 мм. При толщине полок 3 мм и больше значительно увели-

чивается масса конструкции, что увеличивает расходы на перевозку и затрудняет сборку, при этом нет необходимости в высоких показателях запаса прочности. Оптимальным выбором можно считать значения, близкие к 2 мм, поскольку на графике видно, что после этого значения максимальное напряжение уменьшается с уже меньшими темпами, а максимальные деформации при этом остаются приемлемыми. Также стоит учесть стандарты, по которым производятся листы металла, — изготовленные согласно ГОСТ листы проще и дешевле приобрести [9]. Таким образом, остановимся на толщине металла 2 мм.

В результате максимальное перемещение составит 1,54 мм в центре нижней полки конструкции, а максимальное напряжение будет равно 41,8 МПа. Коэффициент запаса прочности при этом составит $250 / 41,8 \approx 6$, что указывает на высокий запас прочности.

Рассчитаем массу стержневой конструкции. Массы стержней выберем согласно ГОСТ 10704–91 «Трубы стальные электросварные прямошовные». Масса пяти вертикальных стержней получилась равной 3,9 кг, масса 10 горизонтальных стержней — 3,2 кг [10]. Массу полок и стенок вычислим исходя из плотности конструкционной стали и объема конструкции. Масса пяти полок составила 38,22 кг, масса двух боковых стенок — 18,24 кг. Таким образом, общая масса конструкции будет равной около 50 кг.

Анализ результатов расчетов. На основе моделирования и анализа трех вариантов конструкции шкафа (сварной, болтовой и стержневой) был сделан вывод, что наиболее предпочтительным является *стержневой вариант* из конструкционной стали с толщиной полок в 2 мм. Толщина боковых стенок составляет 1 мм. Опорные трубы имеют размеры $\varnothing 13,5 \times \varnothing 9,1$ мм, где $\varnothing 13,5$ мм — внешний диаметр, а $\varnothing 9,1$ мм — внутренний. Трубы под полки — $\varnothing 10,2 \times \varnothing 6,2$ мм (внешний и внутренний диаметр соответственно). Этот выбор обусловлен следующими причинами: легкость конструкции, экономичность, модульность и удобство сборки, прочностные расчеты, устойчивость, адаптивность. Рекомендуется использовать стержневую конструкцию с параметрами, приведенными в выводе. Для повышения устойчивости следует предусмотреть крепление к полу или дополнительные поперечные связи, также описанные при моделировании.

Заключение. В рамках исследования была проведена оптимизация конструкции шкафа, предназначенного для выращивания растений. На основе сравнительного анализа трех вариантов конструкций — сварной, болтовой и стержневой — был сделан вывод о том, что стержневая конструкция оптимальна с точки зрения прочности, экономичности и функциональности. Поставленные задачи по оптимизации конструкции, выбору материалов и оценке устойчивости выполнены в полном объеме. Результаты подтверждены

расчетами в системе ANSYS. Стержневая конструкция позволяет снизить затраты на материалы и сборку на 20...30 % по сравнению с другими вариантами, обеспечивая достаточную прочность и устойчивость. В дальнейшем можно проектировать систему с учетом использования более широкого спектра материалов, которые помогут улучшить внешний вид модульной системы для более комфортного использования, например, в домашних условиях.

Также расчеты показали, что помимо стержней в конструкции можно использовать болтовые методы крепления там, где это может быть удобно. Проведенные исследования соответствуют современным требованиям проектирования модульных систем. Использование численного моделирования в системе ANSYS позволило достичь уровня решений, применяемых в ведущих инженерных проектах.

Литература

- [1] *Модульные системы конструкций: технология строительства в России.* URL: <https://bk-resurs.ru/poleznye-sovety/modulnaya-sistema-konstruktsiy> (дата обращения 19.03.2025).
- [2] Чесноков В.А., Базырина Е.Н., Бушуева Т.М., Ильинская Н.Л. *Выращивание растений без почвы.* Ленинград, Изд-во Ленинградского ун-та, 1960, 169 с.
- [3] Трегубова Н. Е. Сравнение методов выращивания зелени традиционным способом и гидропонике в домашних условиях. *Молодой ученый*, 2017, № 33, с. 68–71. URL: <https://moluch.ru/archive/167/45359/> (дата обращения 19.03.2025).
- [4] Аминев Д.А., Захаров Е.Р., Семенякина В.О. и др. Телеметрия основных гидротермических параметров осушительно-оросительных систем. *Технологии инженерных и информационных систем*, 2019, № 2, с. 52–60.
- [5] Карпов Г.Н. *Краткий курс лекций по технической механике (классическая механика и сопротивление материалов).* Москва, Директ-Медиа, 2020, 63 с.
- [6] Клованич С.Ф. *Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики.* Запорожье, Изд-во журнала Свит геотехники, 2009, 400 с.
- [7] *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide.* ANSYS Release 5.6. ANSYS Inc., 1998.
- [8] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 542 с.
- [9] ГОСТ 19903–2015. *Прокат листовой горячекатаный.* Москва, Стандартинформ, 2016, 15 с.
- [10] ГОСТ 10704–91. *Трубы стальные электросварные прямошовные.* Москва, Стандартинформ, 2007, 12 с.

Поступила в редакцию 17.04.2025

Гафаров Тимур Рустемович — студент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Гафаров Булат Рустемович — студент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гафаров Т.Р., Гафаров Б.Р. Оптимизационный расчет системы, направленной на повышение эффективности сельскохозяйственной деятельности. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 3 (98). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/mech/mdsb/1042.html>

OPTIMIZED COMPUTATION OF A SYSTEM APPLIED TO INCREASE EFFICIENCY IN THE AGRICULTURAL BUSINESS

T.R. Gafarov

gafarovtr@student.bmstu.ru

B.R. Gafarov

gafarovbr@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Modern agro-industrial complexes require efficient solutions in the low-volume production systems. In the highly competitive environment, this approach is caused by the necessity to increase productivity, reduce costs and ensure their stable operation. The paper analyzes the existing modular system solutions, compares various parameters (types of connections, design materials, material thicknesses, prices), and computes the structures. The work results in establishing that modular structures are the most advantageous and easy to operate. The paper provides dependences of maximum deformations and maximum stresses on the modular system parameters making it possible to select the most suitable system dimensions.

Keywords: modular system, agro-industrial complex, low-volume production, optimized computation, system design, ANSYS, static computation

Received 17.04.2025

Gafarov T.R. — Student, Department of Computer Systems for Industrial Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Gafarov B.R. — Student, Department of Computer Systems for Industrial Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Gafarov T.R., Gafarov B.R. Optimized computation of a system applied to increase efficiency in the agricultural business. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 3 (98). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/mech/mdsb/1042.html>