

ВНЕДРЕНИЕ УНИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСПОРТИРОВОЧНОЙ ТАРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

© 2023 Ю.С. Гильц, А.И. Хаймович, А.А. Мешков

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Рассмотрены процессы внутритиповой унификации транспортировочных тар с помощью методологии линейного программирования и создание склада на основе методов бережливого производства, целью которых является уменьшение до минимума необходимой номенклатуры тары и улучшение качества хранения и комплектации изделий. Предложено решение создать оптимальный ряд типоразмеров транспортировочной тары для заданной номенклатуры деталей. Габариты тары найдены при помощи оптимизации целевой функции с учётом ограничений.

Ключевые слова: 3D-модель, тара, унификация, проектирование, склад, стеллаж, линейное программирование.

Применение внутритиповой унификации с целью ограничения до минимума необходимой номенклатуры типоразмеров транспортировочной тары и ее элементов с использованием методов линейного программирования имеет большое значение как инструмента оптимизации процесса. Внедрение унификации позволяет повысить качество тары, ее надёжность и долговечность за счёт отработки конструкции и технологии изготовления, а также снизить объём конструкторских работ и период проектирования.

Под унификацией понимают выбор оптимального числа разновидностей изделия, их

параметров и размеров. Наиболее часто унификацию применяют в машиностроении, где различают унификации типоразмерную, внутритиповую и межтиповую. В процессе разработки тары используется внутритиповая унификация, которая осуществляется в изделиях одного и того же функционального назначения, имеющих одинаковое числовое значение главного параметра [1].

В качестве главных параметров проектирования транспортировочной тары выступают следующие параметры конструкции (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1 – Главные параметры конструкции тары

№ п/п	Название параметра	Значение параметра, мм
1	Толщина дна	8
2	Толщины перегородок	
3	Толщина ручек	
4	Толщина стенок	5
5	Толщина перегородок	
6	Толщина крышки	
7	Ширина планок	20
8	Зазор между деталью и элементами тары (на сторону)	10
9	Зазор между дном и стенками тары (по периметру)	5

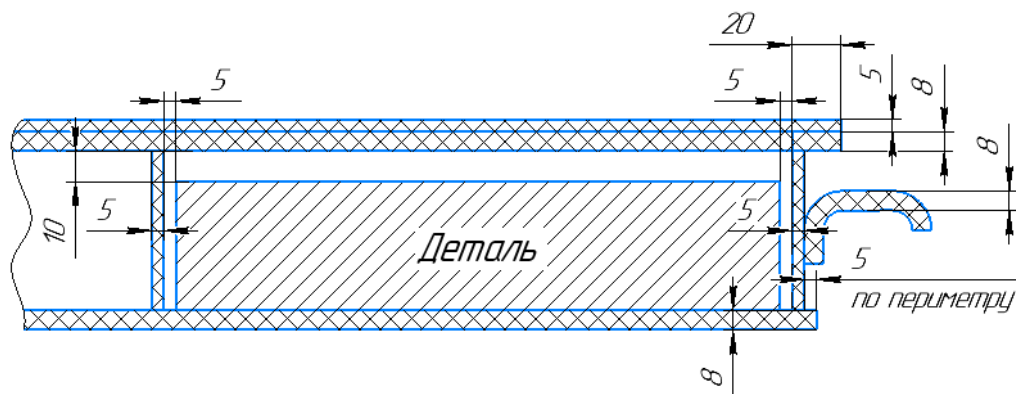


Рисунок 1 – Наглядное изображение главных параметров

Создание бережливого склада является следствием разработки унифицированной тары. Бережливый склад – это гибкая и динамически изменяющаяся во времени система процессов приемки, размещения, хранения, отбора, комплектации и отгрузки, которая максимально быстро подстраивается под колебания потребительского спроса и объемы хранения с минимальными издержками [2].

Для проведения унификации в машиностроении активно используются методы математического моделирования [3 – 5] и информационных технологий [6 – 10].

Например, подобный склад необходимо заполнить стеллажами, размеры полок которых – $1000 \times 800 \times 3000$ мм. На эти стеллажи будут складываться тары с деталями (рис. 2). Соответственно габариты тары необходимо унифицировать, учитывая размеры стеллажей. Положим, что партия деталей равна 28 штукам, а вес этой тары не должен превышать 15 кг. Так как используются принципы бережливого производства, то перевозить детали по складу и цеху будет электрокар, размеры платформы которого равны 1250×2200 мм.

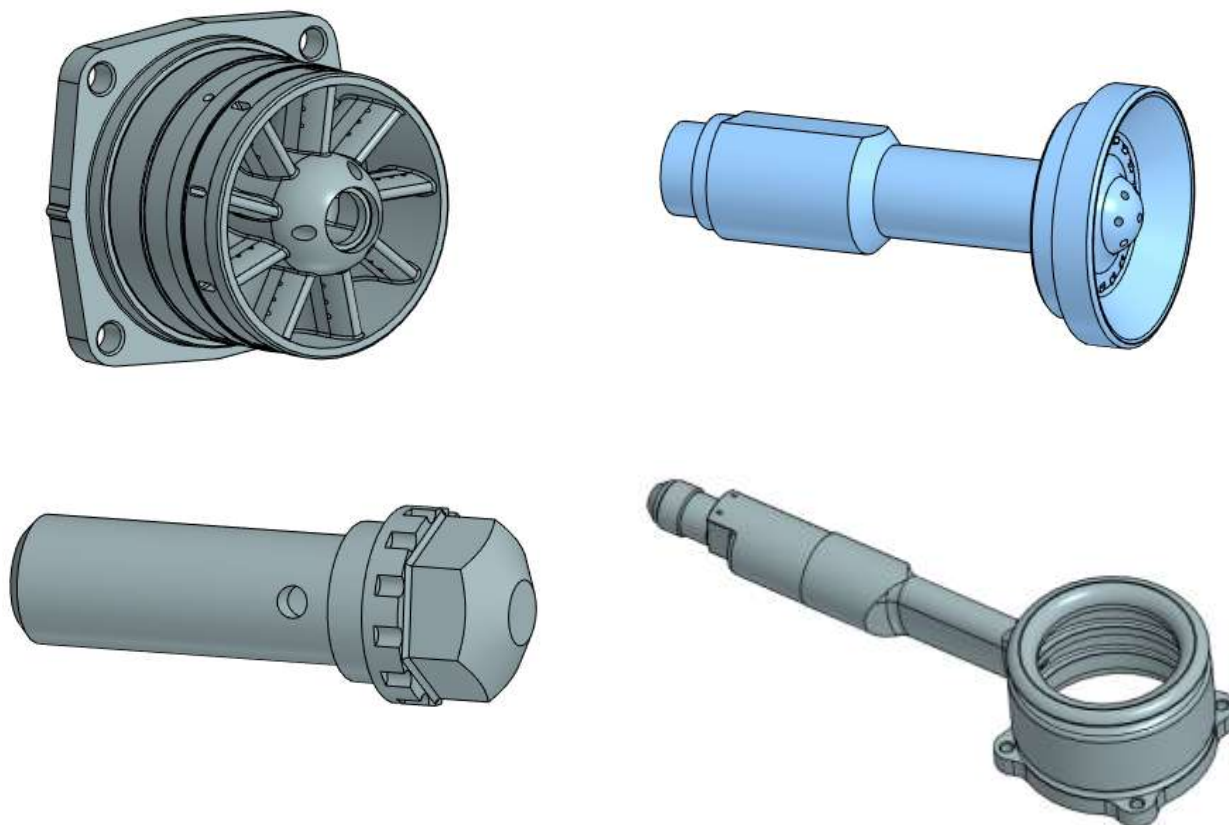


Рисунок 2 – Изображение деталей

Требуется разработать конструкцию тар для определенной номенклатуры деталей (табл. 2).

Таблица 2 – Номенклатура изготавливаемых деталей

№	Наименование детали	Габариты детали, мм
1	Втулка форсунки	41 × 15 × 15
2	Завихритель	83 × 80,5 × 77
3	Корпус	247 × 78 × 52,5
4	Форсунка	65,5 × 34 × 34

Для того чтобы провести унификацию, необходимо определить оптимальные размеры тары под каждый типоразмер. Оптимальный размерный ряд для транспортировочной тары должен быть такой, чтобы туда поместилось наибольшее количество деталей. Для решения этой задачи можно применить линейное программирование как метод решения оптимизационной задачи.

Задача линейного программирования в этом случае сводится к задаче нахождения максимума целевой функции при ограничениях на габариты тары:

$$N_L \cdot N_D \rightarrow \max,$$

где N_L – количество ячеек по ширине;

N_D – количество ячеек по длине.

Далее необходимо создать ряд ограничений, с помощью которых можно рассчитать оптимальные габариты тары. Математическая модель оперирует следующими размерами:

a – ширина детали;

b – длина детали;

$n = 5$ – зазор (на сторону);

S – толщина стенки;

D – длина тары;

L – ширина тары;

N_L – количество ячеек по ширине;

N_D – количество ячеек по длине;

K – количество перегородок по ширине;

B – половина толщины планки ($B = 10$);

C – ширина ручки ($C = 35$ мм);

P – толщина перегородки;

Q – длина площадки кара;

G – ширина площадки кара;

M – масса тары;

m – масса детали;

N – количество деталей;

H – высота тары;

T – толщина дна ($T = 8$);

h – высота детали;

V – толщина планки ($V = 8$);

J – толщина крышки ($J = 5$);

F – высота стеллажа ($3000 = 5 \text{ шт} \cdot 600 \text{ мм}$);

W – ширина полки стеллажа;

Z – длина полки стеллажа.

Часть этих размеров входит в целевую функцию, часть в ограничения. Размеры, приведенные выше, полностью описывают 3D-модель тары.

На рисунках 3 и 4 представлены ключевые параметры, задействованные в оптимизационной модели.

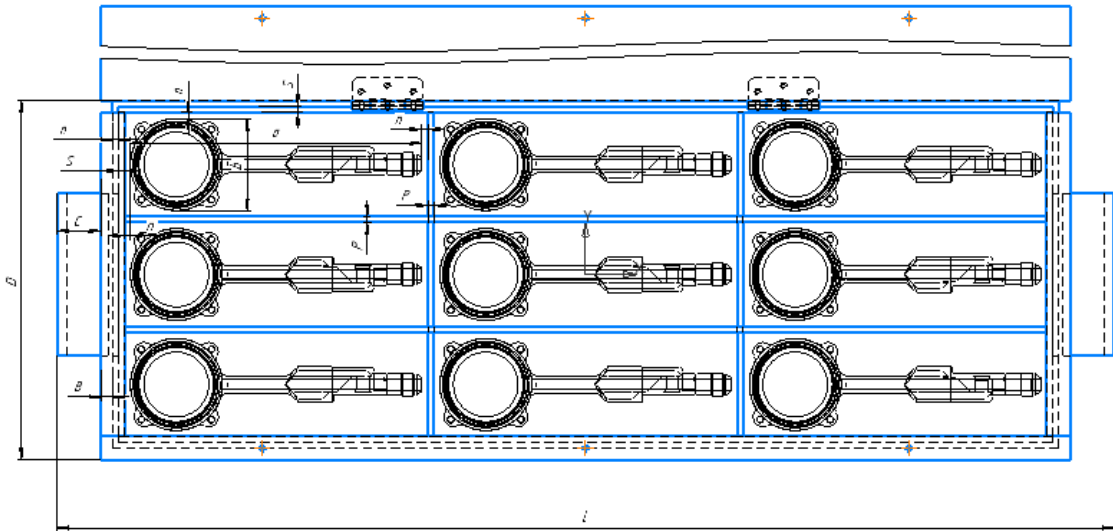


Рисунок 3 – Изображение переменных по ширине и длине

Введем ограничение по ширине тары.
Рассчитаем ширину L:

$$L = 2C + 2B + 2n + 2S + P(N_L - 1) + N_L(a + 2n) = 2C + 2B + 2n + 2S + PN_L - P + aN_L + 2nN_L = 2C + 2B + 2n + 2S - P + N_L(P + a + 2n).$$

Так как величина ширины тары должна быть в аддитивном виде, то проведем логарифмирование:

$$\begin{aligned} \ln N_L + \ln(P + a + 2n) &= \ln(L - 2C - 2B - 2n - 2S + P) \\ \ln N_L + \ln(5 + a + 10) &= \ln(L - 20 - 35 - 2n - 10 + 5) \end{aligned}$$

$$\ln N_L + \ln(15 + a) = \ln(L - 60 - 2n).$$

Для правой части равенства используем разложение в ряд Тейлора с удержанием первых двух членов ряда:

$$\ln N_L + \ln(15 + a) \approx \ln(L - 60) - \frac{2n}{L-60}.$$

Последнее приближенное равенство верно при условии $0 < \frac{2n}{L-60} < 1$.

Поступим также с длиной тары D:

$$\begin{aligned} D &= 2B + P(N_D - 1) + (b + 2n)N_D + S + n \\ &= 2B + PN_D - P + bN_D + 2nN_D \end{aligned}$$

$$+S + n = 2B - P + S + n + N_D(P + b + 2n)$$

$$\begin{aligned} \ln N_D + \ln(P + b + 2n) &= \ln(D - 2B + P - S - n) \\ \ln N_D + \ln(5 + b + 10) &= \ln(D - 20 + 5 - 5 - n) \end{aligned}$$

$$\ln N_D + \ln(15 + b) = \ln(D - 20 - n)$$

$$\ln N_D + \ln(15 + b) \approx \ln(D - 20) - \frac{2n}{D-20}.$$

Составим ограничения по размерам платформы для электрокара:

$$L \leq G$$

$$L \leq 2200$$

$$D \leq Q$$

$$D \leq 1250.$$

Ограничения по размерам полки стеллажа:

$$D \leq Z$$

$$L \leq W$$

$$D \leq 1000$$

$$L \leq 800.$$

Последние ограничения являются более строгими, поэтому получаем в итоге:

$$\ln N_L + \ln(15 + a) \leq \ln(W - 60) - \frac{2n}{W-60}$$

$$\ln N_L + \ln(15 + a) \leq 6,6067 - \frac{2n}{740}$$

$$\ln N_D + \ln(15 + b) \leq \ln(Z - 20) - \frac{2n}{Z-20}$$

$$\ln N_D + \ln(15 + b) \leq 6,8876 - \frac{2n}{980}.$$

Ограничения по размерам полки стеллажа:

$$D \leq Z$$

$$L \leq W$$

$$D \leq 1000$$

$$L \leq 800.$$

Ограничение по массе тары:

$$M + N_L \cdot N_D \cdot m \leq 15 \text{ кг}$$

$$\ln(N_L) + \ln(N_D) \leq \ln(15 - M) - \ln(m).$$

Ограничение по высоте тары:

$$H = T + \square + 2n + V + S.$$

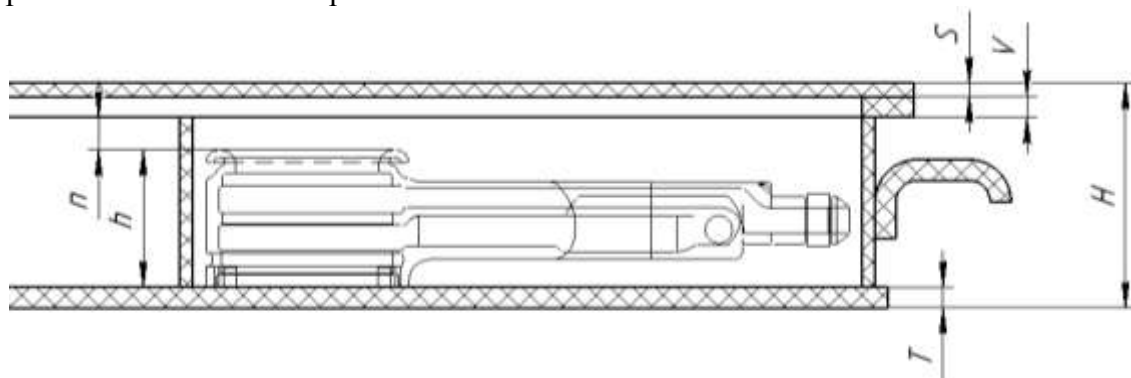


Рисунок 4 – Изображение переменных оптимизации в вертикальном сечении

Дополнительное ограничение по высоте тары:

$$H < \frac{F}{5}$$

$$H < \frac{3000}{5} = 600.$$

Ограничение по ширине ячейки тары:

$$N_L + 2 \cdot n \geq 40 \text{ мм}$$

$$N_L \geq 40 - 10$$

$$N_L \geq 30.$$

Ограничение по длине ячейки тары:

$$N_D + 2 \cdot n \geq 40 \text{ мм}$$

$$N_D \geq 40 - 10$$

$$N_D \geq 30.$$

Исходя из выбранных габаритов стеллажа, максимальный размер тары должен составлять $800 \times 1000 \times 550$ мм. Найти оптималь-

ные размеры тары, учитывая все ограничения, можно при помощи функции Excel – «Поиск решений».

Составим систему уравнений из ограничений:

$$1) \ln(N_L) + \ln(N_D) + 0 \leq \ln(15 - M) - \ln(m)$$

$$2) \ln(N_L) + 0 - \frac{2}{740} \leq 6,6067 - \ln(15 + a)$$

$$3) 0 + \ln(N_D) - \frac{2}{980} \leq 6,8876 - \ln(15 + b)$$

$$4) \ln(N_L) + 0 + 0 \geq \ln(30)$$

$$5) 0 + \ln(N_D) + 0 \geq \ln(30).$$

Существует некоторое количество переменных (табл. 3).

Таблица 3 – Таблица переменных

Обозначение переменной	X ₁	X ₂	X ₃
Значение переменной	$\ln(N_L)$	$\ln(N_D)$	n

Запишем левую сторону системы в виде матрицы коэффициентов A:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -\frac{2}{740} \\ 0 & 1 & -\frac{2}{980} \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Левую часть системы запишем в виде вектора ограничений B:

$$B = \begin{pmatrix} \ln(15 - M) - \ln(m) \\ 6,6067 - \ln(15 + a) \\ 6,8876 - \ln(15 + b) \\ -\ln(30) \\ -\ln(30) \end{pmatrix}.$$

Получается решение в виде вектора иско-
мых переменных:

$$X = [\ln(N_L), \ln(N_D), n]$$

$$A \times X \leq B.$$

Найти оптимальные размеры тары, учитывая все ограничения, можно при помощи функции Excel – «Поиск решений». Результаты для всей номенклатуры деталей, с учётом размера партии, представлены в таблицах 4, 5, 6, 7.

Таблица 4 – Габариты унифицированных тар для детали «втулка форсунки»

Наименование детали	Втулка форсунки	
Габариты детали, мм	41 × 15 × 15	
Тара для малой партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	28 (7 × 4)	501 × 245 × 81
Тара для средней партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	56 (8 × 7)	557 × 410 × 81
Тара для крупной партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	84 (12 × 7)	781 × 410 × 81
Зазор 2n, мм	25 (ширина, длина)...35 (высота)	

Таблица 5 – Габариты унифицированных тар для детали «завихритель»

Наименование детали	Завихритель	
Габариты детали, мм	83 × 80,5 × 77	
Тара для малой партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	14 (7 × 2)	795 × 216 × 103
Тара для средней партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	28 (7 × 4)	795 × 420 × 103
Тара для крупной партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	56 (7 × 8)	795 × 795 × 103
Зазор 2n, мм	10	

Таблица 6 – Габариты унифицированных тар для детали «корпус»

Наименование детали	Корпус	
Габариты детали, мм	247 × 78 × 52,5	
Тара для малой партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	7 (1 × 7)	372 × 680 × 83,5
Тара для средней партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	14 (2 × 7)	264 × 680 × 83,5
Тара для крупной партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	–	–
Зазор 2n, мм	10	

Таблица 7 – Габариты унифицированных тар для детали «форсунка»

Наименование детали	Форсунка	
Габариты детали, мм	65,5 × 34 × 34	
Тара для малой партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	28 (4 × 7)	432 × 438 × 75
Тара для средней партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	56 (8 × 7)	754 × 4438 × 75
Тара для крупной партии	Количество деталей	Габариты тары, мм
	56 (7 × 8)	673 × 733 × 75
Зазор 2n, мм	10	

Таким образом, была проведена унификация изделия «Тара транспортировочная» при помощи методов линейного программирования. Решение позволяет заранее и в необхо-

димых количествах изготовить тары для хранения и транспортировки, а также оптимизирует цеховую логистику методами бережливого производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М., 1975. – 256 с.
2. Трофимова Л.И., Носкова В.Д., Сысуев Е.Б. Современная практика управления складской логистикой // Материалы II Международной научно-практической конференции «Управление цепями поставок в транспортно-логистических системах». – Екатеринбург, 2021. – С. 94 – 99.
3. Хаймович И.Н. Методология организации согласованных механизмов управления процессом конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей // автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук. – Самара, 2008. – 16 с.
4. Хаймович И.Н., Хаймович А.И. Процедурные правила разработки и согласования бизнес-процессов кузнечно-штамповочного производства // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2008. – № 1 (14). – С. 248–252.
5. Хаймович И.Н., Гречников Ф.В. Разработка информационных систем управления конструкторско-технологической подготовкой производства как интегрированной базы информационных и функциональных структур // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 3. – С. 34–41.
6. Хаймович И.Н., Хаймович А.И., Сурков О.С. Практика применения специализированных технологических шаблонов процесса пятиосевой механической обработки лопаточных венцов моноколес // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2016. – № 1. – С. 103–108.
7. Хаймович И.Н., Гречников Ф.В., Ненашев В.Ю. Управление технологической подготовкой производства компрессорных лопаток на основе интегрирования автоматизированного проектирования и инженерного анализа // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 6. – С. 42–46.
8. Хаймович И.Н., Хаймович А.И. Рационализация организации производства машиностроительного предприятия на основе реинжиниринга // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2006. – № 3 (11). – С. 53–57.
9. Хаймович И.Н., Кириченко А.С. Согласование механизмов управления процессами конструкторско-технологической подготовки производства на основе сотрудников подразделений // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 2 (26). – С. 276–281.
10. Хаймович И.Н., Кириченко А.С., Морозов В.В. Распределение материального стимулирования сотрудников при согласовании интересов в конструкторско-технологической подготовке производства // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. – № 3. – С. 42–48.

INTRODUCTION OF UNIFICATION ON THE BASIS OF LINEAR PROGRAMMING IN THE DESIGN OF TRANSPORT BOX IN ENGINEERING

© 2023 Yulia S. Gilts, Aleksandr I. Khaimovich, Artem A. Meshkov

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia

The article deals with the processes of intra-type unification of transport box using the linear programming methodology and the creation of a storage based on lean manufacturing methods, the purpose of which is to reduce the required range of box to a minimum and improve the quality of storage and product packaging. A solution is proposed to create an optimal range of standard sizes of transport box for a given range of parts. The dimensions of the box are found by optimizing the objective function, taking into account the restrictions.

Keywords: 3D model, container, unification, design, warehouse, rack, linear programming.