

МЕТОДИКА ВЫБОРА СХЕМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ МОНОГРУЗОВ ПО ДОПУСКАЕМЫМ НАГРУЗКАМ НА ГРУЗОВОЙ ПОЛ САМОЛЕТА

© 2013 А.С. Константинов

Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета

Поступила в редакцию 26.09.2013

Данная статья посвящена рассмотрению методики выбора силовой схемы погрузки-выгрузки и транспортирования тяжеловесных крупногабаритных уникальных грузов с применением специального погрузочного оборудования (СПО) по допускаемым нагрузкам на грузовой пол самолета, на примере расчета для тяжелого рампового ВС Ан-124-100.

Ключевые слова: тяжеловесный, крупногабаритный груз, рамповый самолет, удельные нагрузки.

При перевозке моногрузов необходимым и достаточным по прочности условием является не превышение погонной распределенной нагрузки на пол самолета (на грузоноситель при колее погрузки $2000 < B < 5000$ мм) $P \leq 9,6$ т/м [3].

Для некоторых моногрузов это условие обеспечивается автоматически из соотношения “длина основания – вес – количество и расположение элементов”. Но для большинства моногрузов выполнение этого условия не очевидно и требует специального анализа.

Теоретической основой для такого анализа может служить теория балок на упругом основании. В этом случае расчетная схема системы “грузовой пол самолета – СПО – груз” имеет вид рис. 1.

В этой схеме роль упругого основания играет пол самолета с уложенным на него грузоносителем, а балкой является грузораспределитель, нагруженный сосредоточенными или распределенными нагрузками. Интенсивность реакции упругого основания определяется формулой:

$$g(x) = K * V(x), \quad (1)$$

где K – постоянная, называемая коэффициентом упругого основания, отнесенная ко всей ширине балки и имеющая размерность кг/см².

Связь балки с упругим основанием предполагается двухсторонней, т.е. существует при любом направлении прогиба (вверх или вниз).

Дифференциальное уравнение упругой линии балки постоянного сечения, лежащей на сплошном упругом основании и под действием распределенной нагрузки $P(x)$ имеет вид:

$$EJ \frac{d^2 v}{dx^2} = M(x); \quad EJ \frac{d^4 v}{dx^4} = p(x);$$

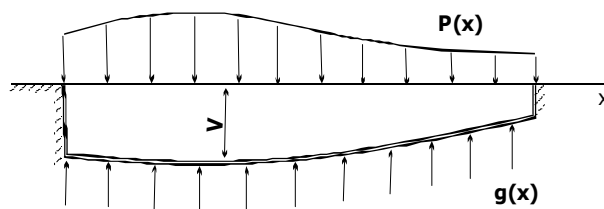
Константинов Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Самолетостроение», ведущий инженер по организации перевозок и логистике, ООО АК «Волга-Днепр».
E-mail: A.Konstantinov@volga-dnepr.com

$$EJ V^4(x) + K * V(x) = p(x), \quad (2)$$

где EJ – изгибная жесткость балки;

$P(x)$ – непрерывная функция или функция с разрывом первого рода.

Схема сил и перемещений имеет вид:



Общее решение уравнений без правой части имеет вид:

$$V(x) = e^{\beta x} (A * \cos \beta x + B * \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C * \cos \beta x + D * \sin \beta x), \quad (3)$$

где $\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EJ}}$;

A, B, C, D – постоянные, определяемые условиями на концах балки

Для дальнейшего анализа особенно важен коэффициент “ K ”, который определяет распределение перемещений и нагрузок по длине балки.

Входящий в формулу коэффициент упругого основания для системы “грузоноситель – пол самолета” на основании опытных данных следует принимать для ВС Ан-124-100 $K=500$ кг/см² как для шпального, так и для бесшпального грузоносителя [2, 3]

Из конкретных случаев нагружения для целей выбора схем транспортирования наиболее важным и часто применяемым является случай нагружения сосредоточенной силой, так к этой схеме приводится большинство реальных схем опирания, в том числе и искусственно, путем установки прокладок, обеспечивающих приложение сосредоточенной силы.

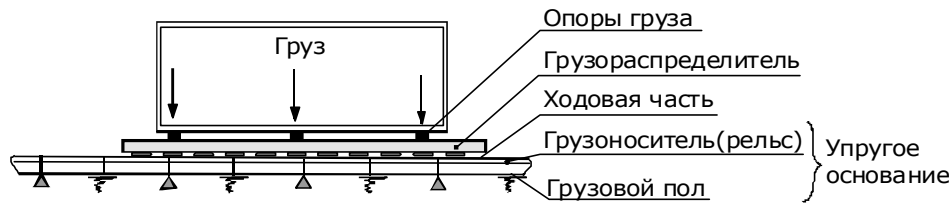


Рис. 1. Схема системы "грузовой пол самолета-СПО-груз"

Для случая бесконечно длинной балки, нагруженной сосредоточенной силой, расчетные формулы будут иметь вид:

$$EJ \frac{d^3 v}{dx^3} = Q(x); \quad 4EJ\beta^3 = -\frac{P}{2}$$

и $C = -\frac{P}{8EJ\beta^3}$. (4)

Прогиб

$$V(x) = \frac{P}{8EJ\beta^3} e^{-\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x) = \frac{P}{8EJ\beta^3} * \eta. \quad (5)$$

Угол поворота

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{P}{4EJ\beta^2} e^{-\beta x} \sin \beta x = -\frac{P}{4EJ\beta^2} * \eta_3. \quad (6)$$

Изгибающий момент

$$M(x) = EJ \frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{P}{4\beta} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) = \frac{P}{4\beta} * \eta_1. \quad (7)$$

Перерезывающая сила

$$Q(x) = EJ \frac{d^3 v}{dx^3} = -\frac{P}{2} e^{-\beta x} \cos \beta x = -\frac{P}{2} * \eta_2. \quad (8)$$

Численные значения η ; η_1 ; η_2 и η_3 приведены в соответствующей литературе, например

в [1], и для справки показаны на рис. 2.

Приведенные выше формулы и значения входящих в них функций позволяют достаточно просто и точно получить распределение нагрузок на полу самолета, а также величины силовых факторов в балке, лежащей на грузоносителе.

В случае действия нескольких сосредоточенных сил применяется принцип суперпозиции.

Предложенная методика расчета не является строгой в математическом смысле, так как не обоснован переход от модели бесконечной балки к балке конечной длины. Однако, в большинстве практических случаев такая замена допустима и существенно упрощает анализ.

Применение данного метода при выборе схем транспортирования реальных моногрузов дало положительные результаты при отсутствии замечаний по прочности, как пола самолета, так и наземного СПО.

В некоторых случаях при проведении более детального анализа при действии нагрузок на балку любой длины, применяется общее решение, данное академиком А.Н. Крыловым [1], согласно которому:

$$V(x) = A_1 Y_1(\beta x) + A_2 Y_2(\beta x) + A_3 Y_3(\beta x) + A_4 Y_4(\beta x) + F(\beta x); \quad (9)$$

$$F(\beta x) = \frac{4}{K} \int_0^x Y_4(\beta x - t) * \frac{p(t)}{EJ} dt,$$

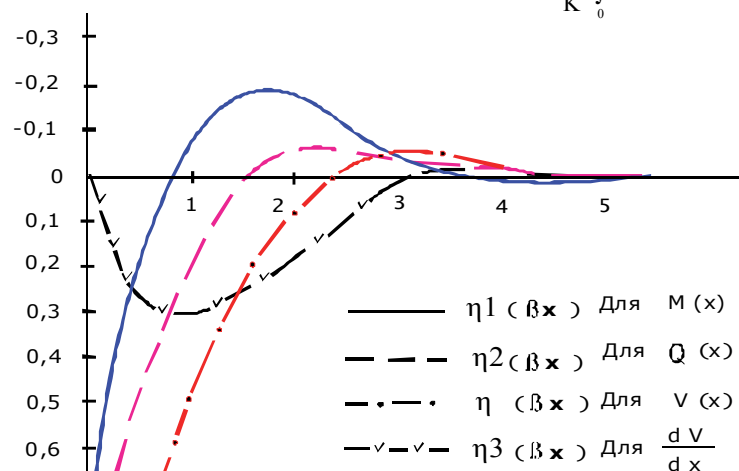


Рис. 2. Численные значения функций η ; η_1 ; η_2 и η_3

где:

$$Y_1(\beta x) = \cos \beta x * \operatorname{ch} \beta x ;$$

$$Y_2(\beta x) = \frac{1}{2\beta}(\operatorname{ch} \beta x * \sin \beta x + \operatorname{ch} \beta x * \cos \beta x); \quad (10)$$

$$Y_3(\beta x) = \frac{1}{2\beta^2}(\operatorname{ch} \beta x * \sin \beta x);$$

$$Y_4(\beta x) = \frac{1}{4\beta^3}(\operatorname{ch} \beta x * \sin \beta x - \operatorname{ch} \beta x * \cos \beta x),$$

обладающие свойством:

$$Y_1 = \frac{dY_2}{dx}; \quad Y_2 = \frac{dY_3}{dx}; \quad Y_3 = \frac{dY_4}{dx};$$

$$\frac{dY_1}{dx} = -4\beta^3 Y_4.$$

Слагаемое $F(\beta x)$ – частное решение уравнения для $V(x)$ при наличии правой части.

Для определения постоянных $A_1; A_2; A_3; A_4$ необходимо удовлетворить условиям на концах балки.

Рассмотрим применение теории, изложенной выше к решению задачи о транспортировке моногруза массой 120 тонн, длиной 10 м.

Груз – емкость высокого давления, имеет цилиндрическую форму диаметром $D=3$ м. и четыре опоры в виде ложементов (рис. 3).

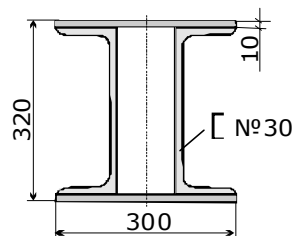
При таких условиях распределенная погон-

ная нагрузка (при $n_y=1$) составляет $120/10 = 12$ тонн/метр, что превышает допустимую величину 9,6 т/м.

Для одной ветви грузоносителя эти величины составляют 6 т/м и 4,8 т/м соответственно. Так как нагрузка от груза передается по четырем сечениям в виде сосредоточенных сил, то превышение допустимых нагрузок на пол будет еще более значительным и для перевозки необходимо применение специальных грузораспределителей.

Как возможный вариант рассмотрим транспортирование на двух тележках, состоящих их двух попарно соединенных балок длиной 6 м. каждая, с расположением относительно ЦТ груза, как показано на рис. 3.

Продольные балки тележек будем рассматривать как балки на упругом основании, принимая $K=500$ кг/см² [3]



Геометрические характеристики балки имеют вид:

$$J = 2 * 5810 + 2 * 1 * 30 * 15.5^2 = 26035 \text{ см}^4$$

$$W = \frac{26035}{16} = 1627 \text{ см}^3$$

Материал Ст.3, $E = 2 * 10^6$ кг/см²

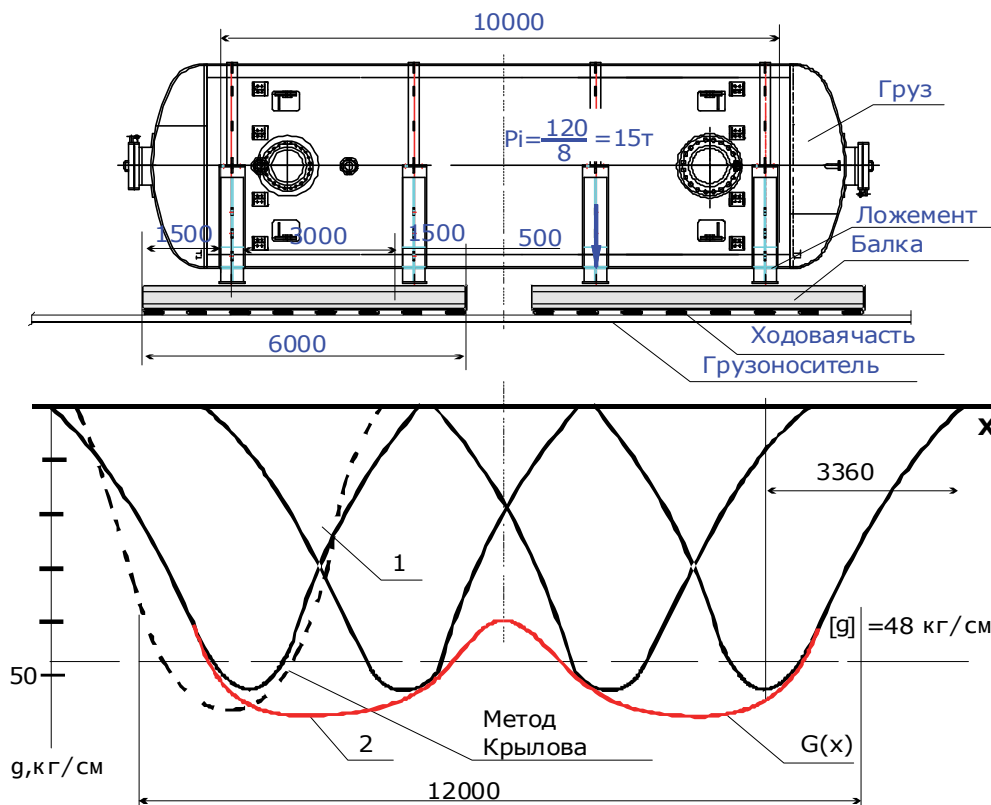


Рис. 3. Схема транспортировки и распределения нагрузок

Тогда

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EJ}} = \sqrt[4]{\frac{500}{4 * 2 * 10^4 * 26035}} = 0,007 \text{ . (11)}$$

По рис. 2. находим, что $\eta(\beta x) = 0$ при $n_x = 2,35$

$$\text{Тогда } x = \frac{2,35}{0,007} = 336 \text{ см}_{\text{И}}$$

$$V_{\text{max}} = \frac{P * \beta}{2K} = \frac{15000 * 0,007}{2 * 500} = 0,105 \text{ см (12)}$$

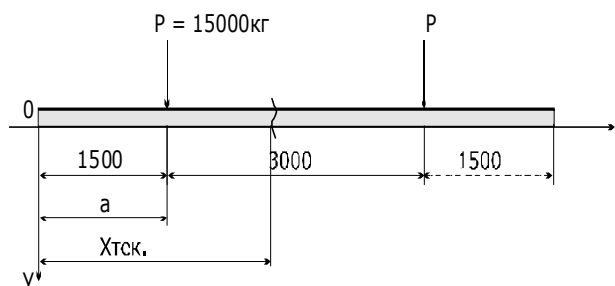
$$g_{\text{max}} = K * V = 500 * 0,105 = 52,5 \text{ кг/см (13)}$$

Распределение нагрузки по упругому основанию от сосредоточенной силы имеет вид – кривая “1” на рис. 3. Применяя принцип суперпозиции, найдем результирующую кривую распределения нагрузки по упругому основанию от системы 4^{ex} сосредоточенных сил – кривая “2” на рис. 3.

Как видно с графика, на длине ~12 м. нагрузка распределяется практически равномерно и незначительно превышает допустимую величину ($[g] = 48 \text{ кг/см}$). Следовательно, выбранная схема транспортирования обеспечивает допустимое распределение нагрузок, легко реализуема и не выходит за габариты грузовой кабины самолета.

Как показывает многолетний опыт выполненных перевозок моногрузов, допускаемая неравномерность нагружения по длине может составлять до 20%, т.е. $g(x)$ может лежать в диапазоне $g(x) = 48 \pm 10 \text{ кг/см}$.

Для сравнения рассмотрим задачу о распределении нагрузок для той же схемы транспортировки моногруза с помощью метода академика А.Н. Крылова [1]. Расчетная схема для одной балки тележки имеет вид:



$$J = 26035 \text{ см}^4$$

$$W = 1627 \text{ см}^3$$

$$K = 500 \text{ кг/см}^2$$

$$L = 600 \text{ см}$$

безразмерная (или относительная) длина балки: $\beta * L = 0,007 * 600 = 4,2$

относительная абсцисса места приложения силы P: $\beta * a = 0,007 * 150 = 1,05$

Упругая линия балки в методу Крылова выражается уравнением:

$$V(x) = [A_1 Y_1(\beta x) + A_2 Y_2(\beta x) +$$

$$+ A_3 Y_3(\beta x) + A_4 Y_4(\beta x)] + \frac{K}{4EJ} Y_4(\beta x - l); \text{ (14)}$$

При наличии свободного опирания на левом конце балки ($x=0$) $A_3=0$ и $A_4=0$. Краевые условия на правом конце: $Q(x)=0$ и $M(x)=0$ приводят к следующим уравнениям относительно неизвестных постоянных A_1 и A_2

$$A_1 Y_3(\beta x) + A_2 Y_4(\beta x) - \frac{mP}{K} Y_2(\beta x) = 0; \text{ (15)}$$

$$A_1 Y_2(\beta x) + A_2 Y_3(\beta x) - \frac{mP}{K} Y_1(\beta x) = 0.$$

По таблицам Крылова [1] находим

$$Y_3(4,2) = -14,527; Y_4(4,2) = -3,2; \\ Y_2(4,2) = -22,7; Y_2(3,15) = -5,87; \\ Y_1(3,15) = -11,69 \text{ (16)}$$

Подставляя численные значения Y_i в систему (15), получим:

$$-14,527 * A_1 - 3,2 * A_2 + 1,23 = 0; \\ -22,7 * A_1 + 14,527 * A_2 + 2,45 = 0. \text{ (17)}$$

Решая систему (17), получим: $A_1 = 0,072$; $A_2 = 0,055$

$$V(x) = A_1 Y_1(\beta x) + A_2 Y_2(\beta x) = \\ = 0,072 * 0,798 + 0,055 * 1,008 = 0,113 \text{ см (18)}$$

$$g(x) = V(x) * K = 0,113 * 500 = 56,4 \text{ кг/см (19)}$$

На левом конце балки ($x=0$) имеем:

$$V(0) = A_1 Y_1(0) + A_2 Y_2(0) = \\ = 0,072 * 1 + 0,055 * 0 = 0,072 \text{ см (20)}$$

$$g(0) = V(0) * K = 0,072 * 500 = 36,0 \text{ кг/см (21)}$$

Определим, на какой длине от точки приложения силы P $V(x) = 0$:

$$A_1 Y_1(\beta x) + A_2 Y_2(\beta x) = 0$$

$$\text{или } A_1 Y_1(\beta x) = -A_2 Y_2(\beta x).$$

$$Y_2(\beta x) = -\frac{0,072}{0,055} = -1,31 Y_1. \text{ (22)}$$

По таблицам фундаментальных функций Крылова находим, что это условие выполняется при $\alpha = 1,84$.

Так как $\beta = \alpha * X_{\text{тек}}$, то

$$X_{V=0} = \alpha / \beta = \frac{1,84}{0,007} = 263 \text{ см}.$$

Результаты расчета показаны на рис. 3. пунктиром для одной силы.

Анализ результатов расчета показывает, что сходимость обоих методов вполне приемлема для практических целей при существенно большей трудоемкости метода Крылова, который целесообразно применять для наиболее ответственных перевозок.

Для оперативной оценки характера распределения нагрузок в зависимости от жесткости грузовой балки или платформы на рис. 4 дана зависимость величины X от момента инерции балки и нанесено значение X для рассмотренной задачи (при $J=26035 \text{ см}^4$)

Кроме Анализа распределения нагрузок на основании, необходимо проверять и прочность самой балки, хотя, как показывает опыт, условие прочности в большинстве случаев выполняется автоматически.

Так, например, для рассмотренной задачи имеем:

$$M_{\max} = \frac{P}{4\beta} = \frac{15000}{4 * 0,007} = 535714 \text{ кг * см} . (23)$$

С учетом перегрузки ($n_v^p = 4$)

$$M_{\max} = 535714 * 4 = 2142856 \text{ кг * см} ; (24)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{2142856}{1627} = 1317 < [\sigma] = 2400 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} . (25)$$

Следует отметить, что при выборе схем транспортирования моногрузов требуется определенная изобретательность и анализ опыта уже ранее выполненных перевозок УНГ. Так, например, для грузов малой длины требуется грузораспределитель большой длины и жесткости, а, следовательно, и строительной высоты, что не всегда

возможно для высоких грузов. В этом случае целесообразно применение прокладок, которые позволяют часть нагрузки гарантированно разнести на концы грузораспределителя по схеме, представленной на рис. 5.

Величина R_k зависит от жесткости балки грузораспределителя, высоты прокладки δ и длины консоли L_k . Как правило, следует добиваться, чтобы R_k составляла 8-12 тонн, что как бы “облегчает” мало протяженный груз на 32-48 тонн и позволяет оставшуюся нагрузку распределить на сравнительно малой длине. При этом надо обязательно проверять прочность консольно-деформируемой части балки грузораспределителя.

Любая уникальная грузовая авиаперевозка означает:

- исследования технических особенностей груза (работа с Заказчиком);
- специальное техническое решение на конкретную перевозку, выполняемое профессионалами, объединяющими экспертизу, технологию и новые идеи;
- проектирование и изготовление дополнительного специального погрузочного оборудования (при необходимости);
- инженерное сопровождение каждой конкретной уникальной перевозки.

Транспортный оператор должен обладать эксклюзивным опытом по уникальным авиаперевозкам крупногабаритных грузов; наличием квалифицированного персонала и сети технических баз и офисов по всему миру; иметь высокие технологии погрузочно-разгрузочных работ по крупногабаритным (нестандартным) и тяжеловесным грузам.

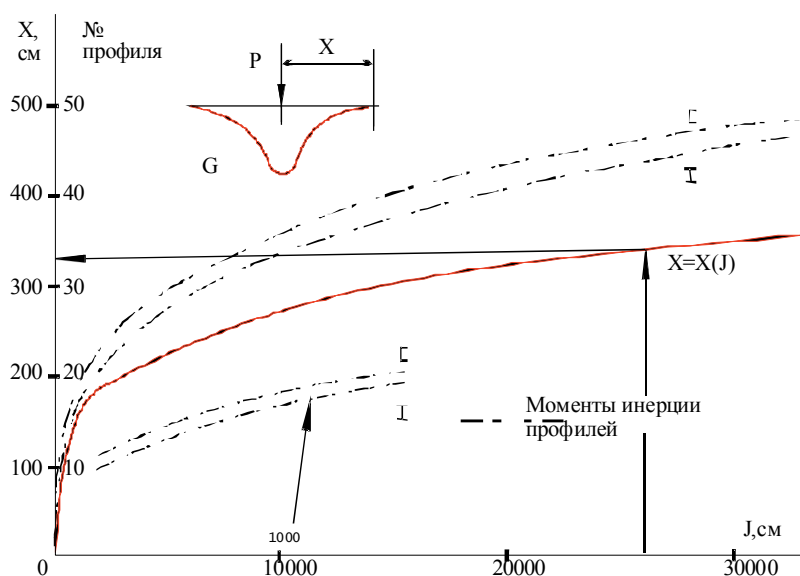


Рис. 4. Распределение давления g от силы P по балке на упругом основании

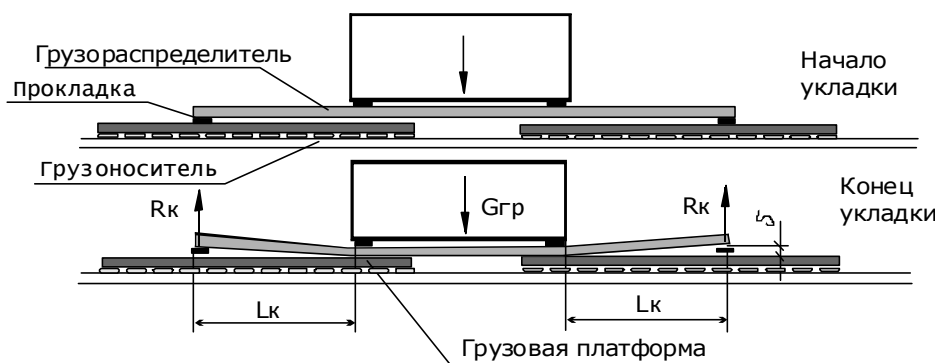


Рис. 5. Схема распределения нагрузок

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора–машиностроителя. в 3 т. Изд. 8-ое, перераб. и доп. [под ред. Жестковой И.Н]. – М.: Машиностроение, 2001. 920 с.
2. Руководство по загрузке и центровке 1.4001.0000.000.000 РЗЦ самолета Ан-124-100.
3. Руководящий технический материал 124.009.002 РТМ “Транспортирование грузов на самолете Ан-124”, АНТК им. А.Н. Антонова.

TECHNIQUE OF OPTION THE SCHEMES TRANSPORTATION FOR ONE-PIECE CARGOES BY PERMISSIBLE LOADS ON THE CARGO FLOOR OF AIRCRAFT

© 2013 A.S. Konstantinov

Institute of Aviation Technologies and Management of the Ulyanovsk state technical university

Given article is devoted consideration the technique of option the force scheme for loading-unloading and transportation of heavy & out-sized unique cargoes with application of the special loading equipment by permissible loads on the cargo floor of aircraft, on an example of calculation for heavy ramp A/C An-124-100.
 Keywords: Heavy & out-sized cargo, ramp airfreight, specific loadings.