

УДК 627.7.047.8

## Расчет защитных характеристик компенсирующего жилета для экипажей высотных самолетов

Р.Г. Тазетдинов, В.А. Зотов, Г.С. Тибрин

Статья посвящена разработке математической модели, методики расчета и расчету защитных характеристик высотно-компенсирующего жилета (ВКЖ), предназначенного для защиты летчика от воздействия пониженного барометрического давления при полетах на больших высотах. Методика позволяет обоснованно выбирать конструктивные параметры жилета на этапе его проектирования, снижая тем самым объем дорогостоящих испытаний.

**Ключевые слова:** высотно-компенсирующий жилет; опорная компенсация; силовая компенсация; герметичная камера; силовая оболочка; натяжное устройство; мягкая оболочка вращения; уравнения равновесия; метод конечных разностей

### Введение

ВКЖ с плоской камерой, названный кратко ЖК-6 (жилет компенсирующий – 6), был разработан в ОАО «Объединение «Вымпел» при участии ЗАО «НПО «Динафорс» в составе комплекта полетного и защитного снаряжения «Жизнь-1» [1].

ЖК-6 является верхней, отделяемой, частью высотно-компенсирующего костюма, нижняя часть которого служит в качестве противоперегрузочного костюма ППК-6. ЖК-6 совместно с ППК-6 должен обеспечивать защиту от воздействия пониженного барометрического давления посредством обжатия верхней части тела летчика длительно при полетах в загерметизированной кабине на высотах до 20 км и в разгерметизированной кабине до 12 км, а также кратковременно при полетах в разгерметизированной кабине на высотах до 20 км до 3-х минут.

Эскиз плана конструктивной схемы жилета представлена на рис. 1.

Он состоит из силовой оболочки 1 и нашитого на нее с внутренней стороны передней части кармана 2, изготовленных из высокопрочной полимерной ткани «Армалон» (арт. 22-03). Этот карман вместе с частью силовой оболочки, охватываемой швами, образует чехол натяжного устройства, в который вкладывается надувная герметичная резиновая камера.

При заполнении камеры кислородом под избыточным давлением  $p$  (соотношение давлений в камере и линии дыхания 3,2:1) она расправляется и передает все давление на

чехол, который имеет несколько меньшие размеры, чем камера. Поэтому камера практически не нагружается, а все усилие принимает на себя чехол. Ткань силовой оболочки имеет некоторую слабинку по отношению к телу для того, чтобы жилет не стеснял движения летчика. Вследствие этого, а также некоторого растяжения ткани силовой оболочки, её края, а также края чехла с камерой приподнимаются (рис. 2) и возникают открытые участки 1 в виде узких полосок на боках груди 1, так и в центре груди 2 (грудная впадина).

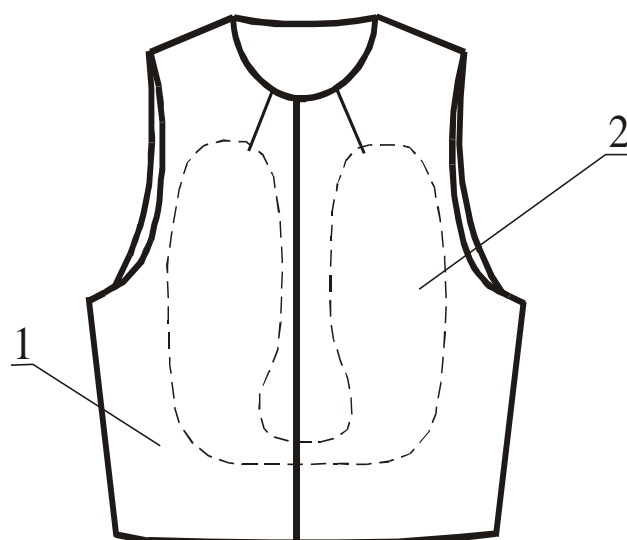


Рис. 1 Конструктивная схема ЖК-6

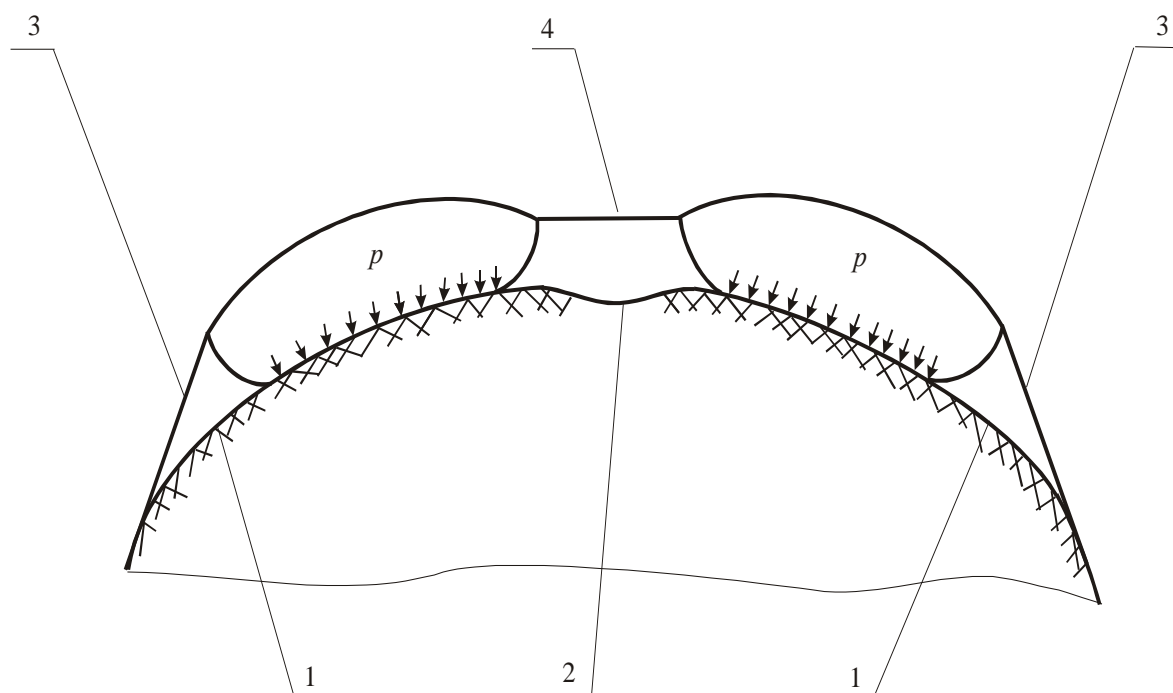


Рис. 2 Образование открытых участков тела и перемычек силовой оболочки жилета при заполнении герметичной камеры газом под избыточным давлением  $p$

Силовая оболочка над указанными местами распрямляется и образует прямые участки, или перемычки – боковые 3 и центральную 4. На участке проймы жилета, где контур силовой оболочки незамкнут по периметру, боковые перемычки не образуются, а просто приподнимаются края пройм. Давление на грудь под чехол передается самой камерой, а на бока и спину – силовой оболочкой через натянутые боковые перемычки. Наличие открытых (некомпенсированных) участков тела под жилетом отрицательно влияет на летчика из-за возможного образования в этих местах ссадин, кровоподтеков в случае разгерметизации кабины самолета.

### **Постановка задачи исследования**

Эффективность ВКЖ, как компенсирующего устройства, и его прочность определяют следующие основные параметры:

1. Геометрическая форма надутой камеры (чехла) и жилета в целом.
2. Распределение давления на тело человека.
3. Распределение напряжений в материале силовой оболочки и швах.

Знание геометрической формы жилета в рабочем (надетом на летчика и заполненным газом) состоянии дает возможность определить площади открытых участков тела между чехлом и силовой оболочкой. Все это в конечном итоге позволяет рассчитать степень опорной (геометрической) компенсации. Второй параметр определяет силовую степень компенсации жилетом избыточного давления газа в камере и её равномерности по поверхности тела. Третий параметр определяет прочность, а, следовательно, надежность и долговечность жилета.

Задачей рационального проектирования ВКЖ, как любой компенсирующей одежды, является обеспечение минимума открытых участков, равномерность компенсации, недопущения концентраторов напряжений в материале и швах наряду с удобством в эксплуатации. Однако характеристики жилета на стадии проектирования можно определить только расчетным или экспериментальным путем. При этом ввиду дороговизны образцов жилетов и самих экспериментов предпочтительным на данном этапе являются расчетные оценки.

К сожалению, несмотря на значительное развитие теории мягких оболочек, методики, позволяющие решить задачи для устройств с нефиксированными границами контакта, каковой является система жилет – тело человека, в настоящее время в литературе отсутствуют [2,3]. Поэтому задачей настоящей работы является разработка математической модели и инженерной методики расчета, позволяющей приближенно рассчитать указанные

выше параметры и тем самым – защитные характеристики ВКЖ – степени опорной и силовой компенсации.

### Основные допущения и геометрия задачи

Поперечное (по утку) сечение системы силовая оболочка – чехол – грудь человека в рабочем состоянии представлено на рис. 3.

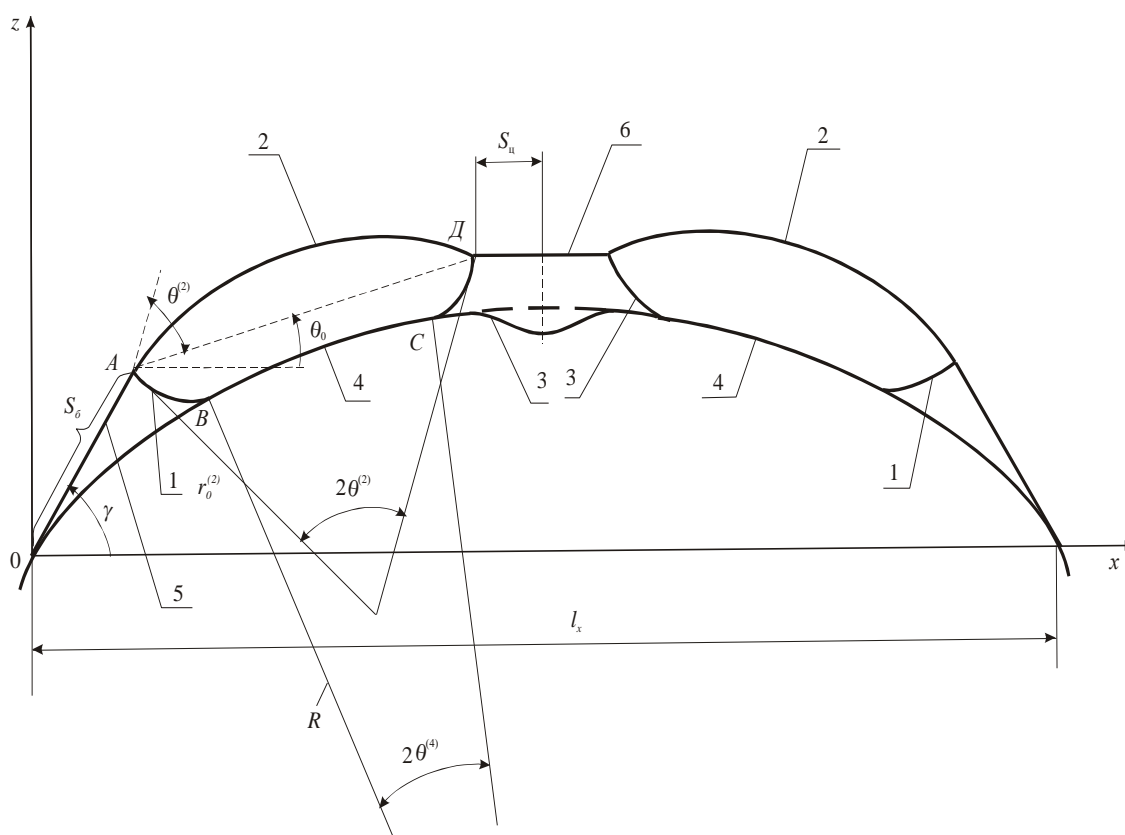


Рис. 3 Геометрическая модель поперечного сечения груди с камерой в рабочем состоянии

Чехол (и камера) состоит из двух симметричных относительно продольной оси человека секций. Поэтому достаточно рассчитать параметры одной, например, левой (глядя спереди) секции. Узкую перемычку, соединяющую секции, в расчет можно не брать, так как она располагается под брюшной секцией ППК-6, который был исследован в [4].

Поперечное сечение секции на рис. 3, расположенное ниже проймы, можно разделить на 4 сектора, образуемые из-за наличия перемычек и опоры: 1 – левый боковой, 2 – верхний, 3 – правый боковой, 4 – нижний опорный о тело. Участки, образованные секторами

1 – 3, являются свободными и отделяются друг от друга швами. Участок, образованный 4-м сектором, оказывает давление на грудь. Сечения, расположенные на уровне проймы не образуют замкнутый контур – нет боковых переемычек. Участки 1 – 3 с внутренней стороны нагружены однородной распределенной нагрузкой – газовым давлением, поэтому их поверхности приближенно можно считать сегментами соответствующих оболочек вращения в общем случае с искривленной в продольном направлении осью вращения. Тогда секторы 1 – 3 поперечных сечений можно также приближенно считать дугами окружности, что было подтверждено экспериментально.

Контур поперечного сечения поверхности груди на основании измерений, проведенных авторами на человеческих фигурах, в первом приближении можно аппроксимировать дугой эллипса с погрешностью 5 – 10%. Форма участка 4 повторяет поверхность участка груди. Однако для приближенных расчетов нижний сектор также можно принять за дугу окружности. Соответственно и участок 4 можно рассматривать как сегменты оболочки вращения. В дальнейшем в практических расчетах искривлением осей вращения оболочек участков 2, 4 было пренебрежено, так как измерения показали, что для них радиусы кривизны осей вращения  $R$  велики и можно принять  $R \rightarrow \infty$ .

В качестве второго важного допущения пренебрежем трением ткани силовой оболочки и чехла о белье летчика. Это можно сделать потому, что белье обычно шелковое, имеющее малый коэффициент трения. Кроме того, мягкие ткани тела могут смещаться на некоторое расстояние даже под действием небольших усилий, а сами смещения не большие – при рабочих нагрузках не более 2 – 3%.

Третьим допущением является пренебрежение деформацией тела летчика, так как, согласно расчетным оценкам, она незначительна, не более 1-2 мм.

Для расчетов удобно выбрать начало плоской декартовой системы координат, связанной с данным сечением, в первой точке касания силовой оболочки с грудью, например, слева на рис. 3. Ось  $x$  направлена к середине тела параллельно большой оси эллипса груди, или утку ткани, а ось  $z$  параллельно малой оси эллипса. Ось  $y$  для всего жилета направлена параллельно продольной оси тела, или основе ткани.

### **Математическая модель**

Поскольку участки чехла являются сегментами оболочки вращения, то задачу удобно решать в угловой системе координат, вводя полярный угол  $\theta$  – в направлении утка, меридианный угол  $\varphi$  – в направлении основы, радиус кривизны  $r_0$  для каждого сектора.

Для определения 18 геометрических параметров поперечных  $r_0$  сечений на участке ниже проймы, определяющих опорную компенсацию – радиусов, углов охвата  $\theta$ , длин перемычек, угла наклона боковой перемычки  $\gamma$  и швов  $\beta$  к оси  $x$ , координаты крайних точек касания нижнего сектора и боковой перемычки поверхности тела – получено 17 алгебраических уравнений связи между этими величинами исходя из условий взаимного касания элементов силовой оболочки и эллипса груди, равновесия действующих сил и др. Ввиду громоздкости этих уравнений мы их не приводим. На участке проймы получено 12 уравнений связи для определения 12 неизвестных, т.е. система замкнутая.

Однако в эти уравнения входят поперечные (по утку)  $N_\theta$  и продольные (по основе)  $N_\varphi$  погонные силы, действующие на участках. Для определения этих сил была получена система дифференциальных уравнений равновесия элемента оболочки вращения с криволинейной осью:

$$\left. \begin{aligned} (N_\varphi - N_\theta) \cdot \frac{r_0 \sin \theta}{R + r_0 \cos \theta} + \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} &= 0; \\ \frac{\partial(N_\varphi r_0)}{\partial \varphi} - N_\theta r_1 \cos \theta &= 0; \\ N_\varphi / r_1 + N_\theta / r_2 + Z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $R$  - текущий радиус кривизны оси вращения;  $r_1, r_2$  - главные радиусы кривизны оболочки в заданной точке;  $Z$  - нормальное напряжение, действующее на поверхность оболочки:  $Z = -p$  - для секторов 1 – 3,  $Z = -p + p_n$  - для сектора 4;  $p_n$  - давление нормальной реакции тела, по величине равно давлению на тело.

Аналитическое решение системы (1) либо весьма громоздкое (для участков 2, 4) либо вообще невозможно (для участков 1,3). Если оболочки в направлении оси  $y$  разбить на  $i$  малых частей (элементов), то формы этих частей можно упростить, приняв, что: 1) оболочка участка образована вращением вокруг продольной оси дуги окружности постоянного радиуса  $r_1$ ; 2) оболочки участков 1,3 – изогнутые в одной плоскости цилиндры радиуса  $r_0$ ; 3) оболочка нижнего участка – прямой цилиндр ( $r_1 \rightarrow \infty$ ). Для этих «коротких» оболочек были получены достаточно простые аналитические зависимости  $N_\varphi, N_\theta$  от  $\varphi$  и  $\theta$ , связывающие эти силы с  $p, p_n$  и радиусами кривизны:

а) верхний участок:

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= \frac{pr_1}{2} \left( 2 - \frac{r_0}{r_1 \sin \varphi} \right); \\ N_\theta &= \frac{pr_1}{2} \left( 2 - \frac{2r_0}{r_1 \sin \varphi} + \frac{r_0^2}{r_1 \sin^2 \varphi} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

б) боковые участки:

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= \frac{pr_0}{2}; \\ N_\theta &= \frac{pr_0}{2} \cdot \frac{2R + r_0 \cos \theta}{R + r_0 \cos \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

в) нижний участок:

$$\left. \begin{aligned} N_\varphi &= N_{\varphi\bar{A}}; \\ N_\theta &= N_{\theta\bar{A}}; \\ p_i &= p + \frac{N_{\theta\bar{A}}}{r_0}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $N_\varphi, N_\theta$  - значения погонных сил на границе одного из боковых секторов.

В дальнейшем уравнения (2) – (4) используются в расчетах по методу конечных разностей в направлении продольной оси  $y$ .

Главные радиусы кривизны  $r_{1i}, r_{2i}$  малого (по оси  $y$ ) элемента оболочки  $i$  можно найти, если известны текущий радиус кривизны её оси  $R_i$ , радиус окружности контура её поперечного сечения  $r_0$  и шаг разбиения оболочки по оси  $y$  на элементы  $h$ , методом конечных разностей:

$$\left. \begin{aligned} r_{1i} &\approx \frac{\left(1 + \frac{(z_{i+1} - z_{i-1})^2}{2h}\right)^{3/2}}{(z_{i+1} + 2z_i + z_{i-1})/h^2}; \\ r_{2i} &\approx \frac{r_{0i}}{\cos \arctg((z_{i+1} - z_{i-1})/2h)}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В формуле (5)  $r_{1i}, r_{2i}$  – соответственно продольный и поперечный главные радиусы кривизны в данной точке;

$$\left. \begin{aligned} z_i &= \frac{R_i}{\cos \theta} + r_{0i}; \\ z_{i-1} &= \sqrt{\left(\frac{R_i}{\cos \theta} + r_{0(i-1)}\right)^2 - h^2}; \\ z_{i+1} &= \sqrt{\left(\frac{R_i}{\cos \theta} + r_{0(i+1)}\right)^2 - h^2}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$r_{0(i-1)}, r_{0i}, r_{0(i+1)}$  – радиусы окружности 3-х следующих друг за другом элементов.

Зная выражения для погонных сил, можно получить недостающее (18-е) уравнение связи между геометрическими параметрами секторов на участке ниже проймы из условия равенства в отсутствие сил трения поперечных погонных сил в точках В и С сечения

$$N_{\theta}^{(1)}(B) = N_{\theta}^{(3)}(C). \quad (7)$$

Принимая в пределах  $i$ -х элементов оболочек секторов 1 и 3  $r_{0i}^{(1)}$  и  $r_{0i}^{(3)}$  постоянными и применяя в (7) вторую из формул (3), получаем искомое уравнение:

$$r_{0i}^{(1)} \frac{2R_{1i} + r_{0i}^{(1)} \cos \theta(B)}{R_{1i} + r_{0i}^{(1)} \cos \theta(B)} = r_{0i}^{(3)} \frac{2R_{3i} + r_{0i}^{(3)} \cos \theta(C)}{R_{3i} + r_{0i}^{(3)} \cos \theta(C)}, \quad (8)$$

где  $R_{1i}, R_{3i}$  – текущие радиусы кривизны осей вращения на участках 1 и 3.

### Методика и общая характеристика алгоритма расчета

Для проведения расчетов прежде всего необходимо учесть изменение размеров ткани силовой оболочки и карманов в натянутом состоянии, т.е. определить большие упругие деформации. Для этого были использованы результаты испытаний тканей [1]. Для ткани армалон в рабочем диапазоне погонных сил 0 ... 15000 Н/м эти данные можно аппроксимировать линейными зависимостями. Например, для утка

$$N_{\theta} = E_y (\varepsilon - \varepsilon_{0y}),$$

где  $E_y, \varepsilon_{0y}$  – погонный модуль упругости и начальная деформация по утку. Используя эту формулу можно найти текущую поперечную слабины ткани  $\Delta$  в данном сечении

$$\Delta = \Delta_0 + (L + \Delta_0 - 2b_0) \cdot (\varepsilon_{0y} + N_{\sigma,n} / E_y),$$

где  $\Delta_0$  – исходная слабина ткани;  $L$  – периметр тела человека;  $b_0$  – начальная ширина чехла;  $N_{\sigma,n}$  – поперечная погонная сила в боковой перемычке. Ширину верха и низа чехла в натянутом состоянии, учитывая, что  $N_{\theta}$  в секторах 2 и 4 не зависят от  $\theta_i$  можно рассчитать по формулам:

$$b_a = b_0 \left( 1 + \varepsilon_{0y} + \frac{N_{\theta}^{(3)}}{E_y} \right);$$

$$b_n = b_0 \left( 1 + \varepsilon_{0y} + \frac{N_{\theta}^{(4)}}{E_y} \right).$$

Для ткани армалон  $E_y = 533$  кН/м;  $\varepsilon_{0y} = 0,005$ .

Растяжение ткани в продольном направлении, а также в секторах 1, 3, не может заметно влиять на геометрию чехла, так как, согласно оценкам, соответствующие погонные силы намного меньше поперечных сил в секторах 2, 4.



Совместный численный расчет полученных систем уравнений проводился путем последовательных приближений, сочетая методы Ньютона и конечных разностей (по оси  $y$ ). В качестве исходных параметров для заданного сечения  $y$  принимались: длины полуосей эллипса сечения тела  $a$ ,  $c$  и периметр тела  $L$ , измеренные на человеческих фигурах; номинальная ширина чехла (камеры)  $b_0$ ; углы наклона швов чехла к продольной оси  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ; половина ширины центральной перемычки  $S_{ц}$ ; радиусы кривизны швов  $R_1$ ,  $R_2$ , приняты за радиусы кривизны осей вращения оболочек участков 1,3. Все эти величины измерялись непосредственно на плане экспериментального образца жилета ЖК-6. Для сечений в области проймы задавались также высота подъема края чехла  $H$ , хорд  $l'_x$ , определенные из экспериментов.

Расчеты проводились для базовой модели проектируемого жилета ЖК-6 52 размера. Исходные данные в зависимости от продольной координаты  $y$  с шагом 3 см приведены в таблице. Значения параметров  $a$ ,  $c$ ,  $L$ ,  $H$ ,  $l'_x$  даны для свободного дыхания и указаны изменения при полном вдохе (знак "+") и полном выдохе (знак "-"). Расчеты выполнялись в зависимости от трех параметров: избыточного давления  $p = 0 \dots 90$  кПа; степени заполнения легких кислородом (полный вдох,  $\Delta_0 = 0,025$  м; свободное дыхание,  $\Delta_0 = 0,05$  м; полный выдох,  $\Delta_0 = 0,075$  м); ширины камеры (чехла)  $b_0$ .

Алгоритм расчета довольно громоздкий, хотя прост по своей сути. Здесь дадим только его краткую характеристику. Для запуска итерационного процесса необходимо задать значение по крайней мере одного из рассчитываемых параметров. Анализ уравнений показывает, что наиболее целесообразно задать угол наклона боковых перемычек  $\gamma$ , а также  $\Delta$  первого приближения. После этого процесс повторяется и так до сходимости всех параметров в двух последних итерациях с заданной погрешностью  $10^{-4}$  %.

Исходные данные для расчета параметров ЖК-6

Таблица

$y$ , см	$a$ , см	$c$ , см	$b_0$ , см	$\beta_1$ , рад	$\beta_2$ , рад	$R_1, c$ м	$R_2$ , см	$S_{ц}$ , см	$L$ , см	$H$ , см	$l'_x$ , см
3	21,0±1,2	151± 1,0	10,8	0,489	0,489	7,2	7,2	6,0	114,2 ±6,0	1,6± 0,4	16,1 ±0,9
6	20,7±1,1	14,9 ±1,0	12,7	0,140	0,140	14,0	14,0	5,0	11,5 ±6,0	2,0± 0,4	16,7 ±0,9
9	20,4±1,1	14,7 ±1,0	13,3	0,078	0,078	∞	∞	4,6	110,9 ±5,8	1,4± 0,3	17,0 ±1,0

$y$ , см	$a$ , см	$c$ , см	$b_0$ , см	$\beta_1$ , рад	$\beta_2$ , рад	$R_{1,c}$ , м	$R_2$ , см	$S_{II}$ , см	$L$ , см	$H$ , см	$I'_x$ , см
12	20,1±1,1	14,5 ±0,9	13,8	0,078	0,078	∞	∞	4,4	109,3 ±5,8		
15	19,8±1,0	14,3 ±0,9	14,3	0,08	0,078	9,0	10,0	4,2	107,6 ±5,8		
18	19,4±0,9	14,0 ±0,8	14,2	-0,08	-0,165	16,7	5,9	4,3	105,5 ±5,7		
21	19,0±0,9	13,7 ±0,8	12,9	-0,078	-0,480	∞	∞	5,3	103,3 ±5,7		
24	18,7±0,8	13,5 ±0,7	11,3	-0,078	-0,201	∞	8,2	6,4	101,7 ±5,7		
27	18,5±0,8	13,3 ±0,7	10,8	-0,078	0,305	∞	7,8	6,4	100,6 ±5,6		
30	18,4±0,8	13,2 ±0,7	12,5	-0,078	0,873	∞	7,0	4,2	100,0 ±5,6		

## Анализ расчетных данных

Объем статьи не позволяет подробно анализировать все полученные расчетные зависимости. Ограничимся только основными из них. На рис. 4 приведены зависимости относительных длин обжатой части груди  $\delta_r$  и всего контура тела  $\delta_0$  от координаты  $y$ .

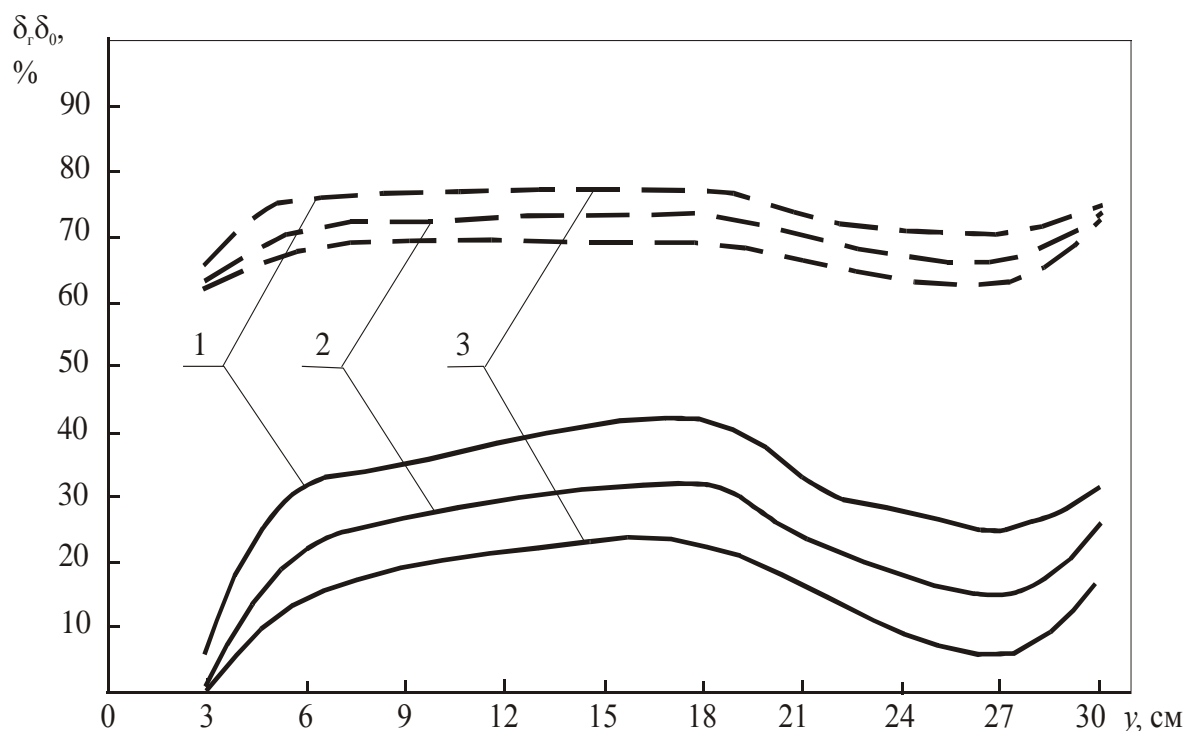


Рис. 4 Зависимости относительных длин обжатых частей контуров груди под камерой  $\delta_r$  (—) и всего тела  $\delta_0$  (— — —) от продольной координаты при различных состояниях дыхания: 1 – полный вдох; 2 – свободное дыхание; 3 – полный выдох ( $p=50$  кПа)

При расчете принималось, что спинная впадина шириной 6 см силовой оболочкой не обжимается. Как видно  $\delta_0 > \delta_r$ . Причина этого – более полный контакт силовой оболочки с боками и спиной, чем с грудью, где имеется больше открытых участков под перемычками. Усредненные по длине жилета значения  $\delta_r$  и  $\delta_0$ , или опорные степени компенсации по груди и жилету, составляют соответственно 20 – 40% и 62 – 67%. Максимальные значения относятся к полному вдоху ( $\Delta_0 = 2,5$  см), а минимальные к полному выдоху ( $\Delta_0 = 7,5$  см), т.е. степень опорной компенсации изменяется с ритмом дыхания. Это благоприятствует дыханию под избыточным давлением, так как наибольший охват тела жилетом происходит в конце вдоха, когда опасность растяжения легких наибольшая. Следует отметить также, что давление в камере незначительно (всего 2 – 3%) влияет на степень опорной компенсации, что

связано с малым растяжением ткани. Аналогичные расчеты для серийного костюма ВКК-15К дали в среднем на 4 – 5% меньшие значения степени опорной компенсации.

Исследовалось также влияние ширины камеры на опорную компенсацию. На рис. 5 представлены зависимости  $\bar{\delta}_0$  от относительной ширины камеры  $\bar{b} = b_m / b'$ , принимая за базовое значение  $b'$  ширину камеры ВКК-15К.

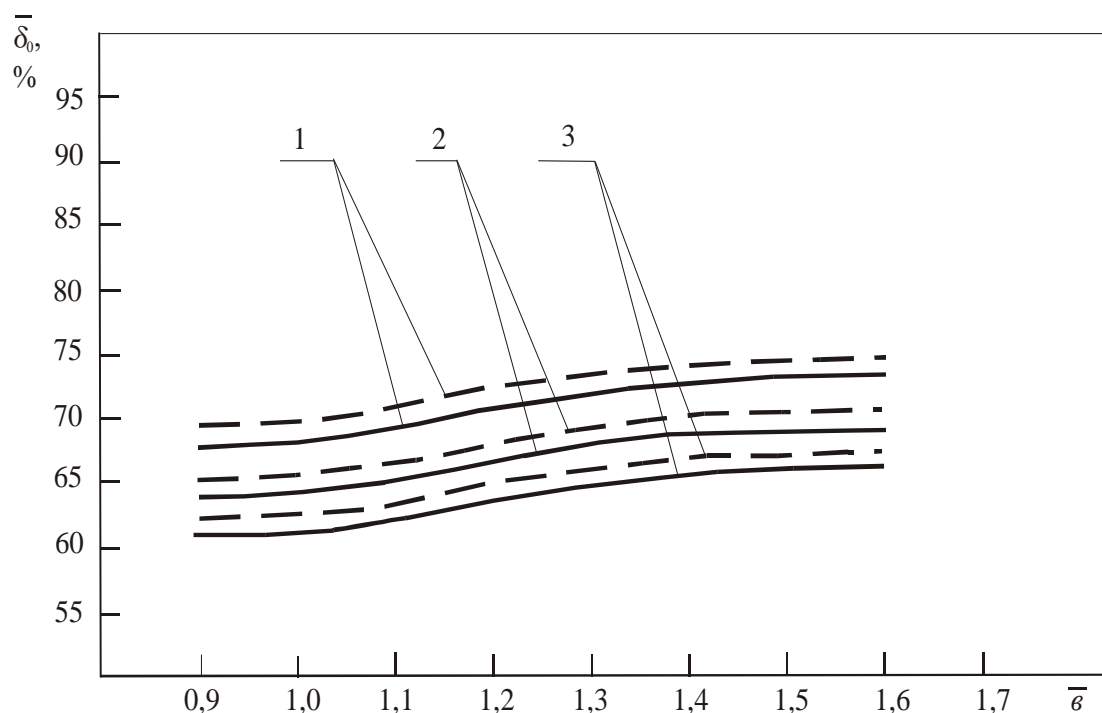


Рис. 5 Зависимости опорной степени компенсации по всему жилету от относительной ширины камеры: — с обычной высотой камеры и ширины центральной перемычки; — с увеличенной высотой камеры и уменьшенной шириной центральной перемычки: 1 – полный вдох; 2 – свободное дыхание; 3 – полный выдох ( $p=50$  кПа)

Резерв увеличения  $\bar{b}$  до достижения камерой крайнего меридиана тела для области ниже проймы составляет в среднем около 1,6, а для участка в области проймы – 1,3. Как видно,  $\bar{\delta}_0$  увеличивается с ростом  $\bar{b}$ , однако скорость этого увеличения быстро падает с приближением к боку тела. Видно также что, некоторое увеличение  $\bar{\delta}_0$  можно получить, если сократить ширину центральной перемычки  $S_u$ , которая оказывается избыточной ввиду того, что под сектором 3 возникает открытый участок тела за пределами грудной впадины. Ликвидируя этот участок  $S_u$  можно сократить примерно на 40%.

Кроме того, можно удлинить камеру, подняв его верх почти до ключиц. При этом ключицы оказываются на открытых участках тела и нагрузка на них не будет оказываться.

Расчеты, проведенные с учетом указанных изменений, дают увеличение  $\bar{\delta}_0$  в среднем еще на 4 – 4,5%.

Наибольшие значения погонных сил достигаются на верхнем участке чехла ( $N_{\theta}^{(2)} \approx 6750 \text{ Н/м}$ ;  $N_{\varphi}^{(2)} \approx 3500 \text{ Н/м}$ ). На всех остальных участках погонные силы раза в 2 меньше. Погонная сила в боковой перемычке  $N_{\delta}$  является векторной суммой сил  $N_{\theta}^{(2)}$  и  $N_{\varphi}^{(1)}$  в точке А (рис. 3), однако ее зависимости от  $y$  и  $\Delta$  в основном определяется  $N_{\theta}^{(2)}$ , как доминирующей по абсолютной величине (рис. 6). Именно  $N_{\delta}$  является одной из важнейших величин, определяющих степень силовой компенсации, так как именно она определяет давление на тело за пределами камеры (бока, спина). Кроме того,  $N_{\delta}$  определяет и прочность жилета, поскольку она действует на самое слабое место конструкции – продольный боковой запошивочный шов. При максимальной поперечной погонной силе в боковой перемычке  $N_{\delta} = 4152 \text{ Н/м}$  для  $p = 50 \text{ кПа}$  (это даже больше, чем необходимое на высоте 20 км,  $\Delta_0 = 2.5 \text{ см}$  и погонном пределе прочности на разрыв запошивочного шва для ткани армалон  $N_{ш} = 17069 \text{ Н/м}$  минимальный запас прочности жилета составляет  $K=4,1$  при допустимом  $K=2$ , т.е. жилет обладает достаточным запасом прочности.

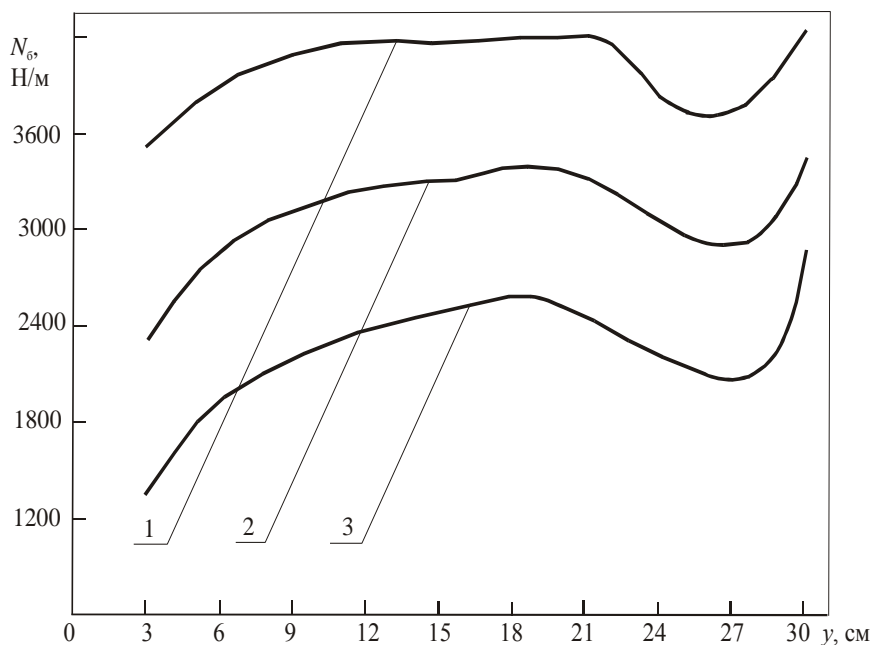


Рис. 6 Зависимости погонной силы в боковой перемычке от продольной координаты при различных состояниях дыхания: 1 – полный выдох; 2 – свободное дыхание; 3 – полный выдох ( $p=50 \text{ кПа}$ )

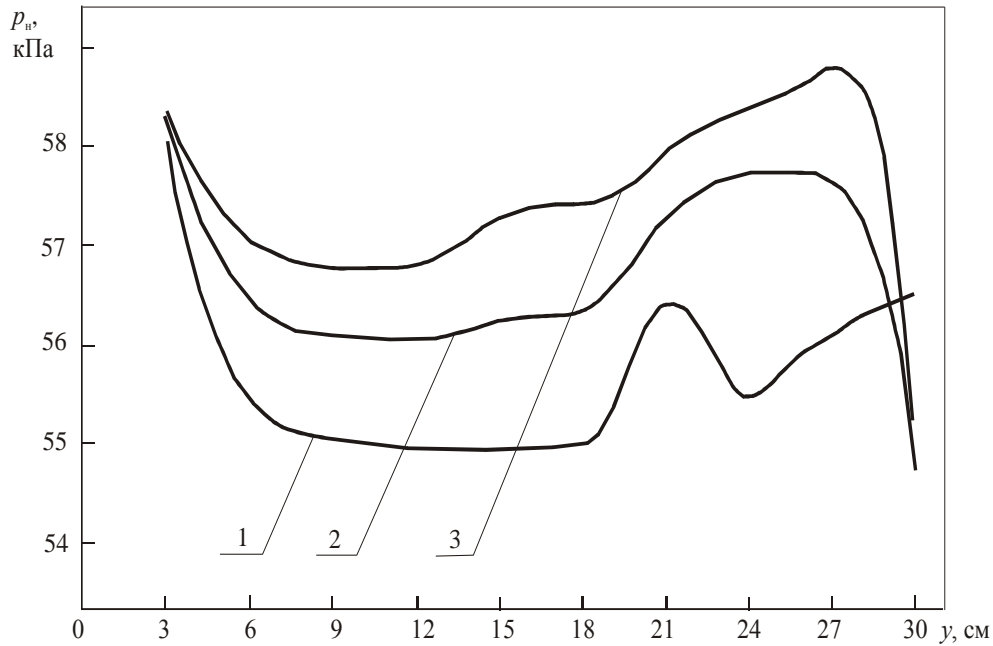


Рис. 7 Зависимости давления на тело под камерой от продольной координаты при различных состояниях дыхания: 1 – полный выдох; 2 – свободное дыхание; 3 – полный выдох ( $p=50$  кПа)

Зависимости давления на тело под камерой  $p_n$  от  $y$  приведена на рис. 7. Превышение его над газовым давлением  $p$  на 10...15% и характер изменения с  $y$  и  $\Delta_0$  целиком обусловлено натяжением нижнего участка силами  $N_{\theta}^{(4)}$  и  $N_{\varphi}^{(4)}$ . Зависимости  $p_n$  от  $p$  являются почти линейными, что связано с весьма незначительным изменением формы чехла ввиду малости деформации ткани.

Давление на тело за пределами камеры  $p'_n$  также имеет важное значение для компенсации. Для сечений ниже проймы

$$p'_n = N_{\sigma} / r ,$$

где  $r$  – радиус кривизны тела в данной точке, который определяется путем измерений, принимая контур спины полуэллипсом. Для сечений в области проймы

$$p'_n \approx \bar{N}_{\varphi}^{(2)} / r' ,$$

где  $r'$  – продольный радиус кривизны спины;  $\bar{N}_{\varphi}^{(2)}$  - среднее значение  $N_{\varphi}^{(2)}$  в верхней части тела.

На рис. 8 показана эпюра давления на тело по контуру для сечения  $y=15$  см. Как видно, наибольшее давление приходится на грудь, а на бока и на спину меньше.

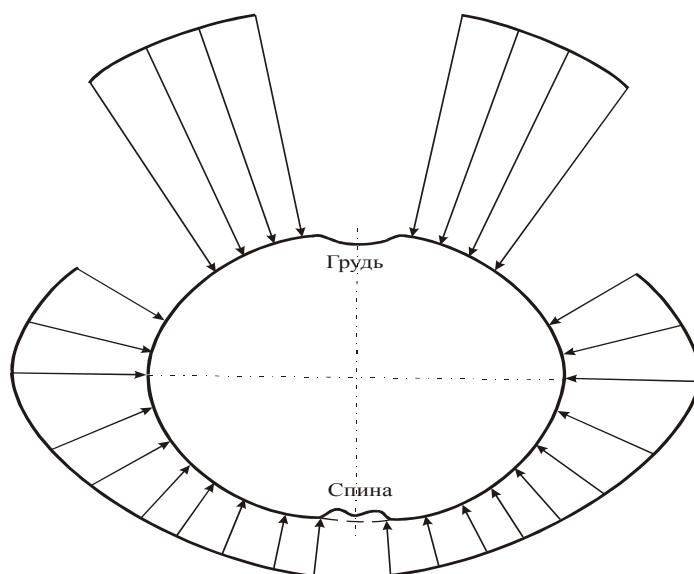


Рис. 8 Эпюра давлений на тело в жилете повышенного давления при свободном дыхании ( $p=50$  кПа;  $\Delta_0=5$ см;  $y=15$ см)

Хотя на участки под перемычками камера и не давит, однако очевидно, что ребра на этих участках также изгибаются под действием соседних нагруженных участков.

Степень силовой компенсации  $\beta$ , определяется как отношение среднего давления на тело к избыточному давлению газа в камере [5]. Для контура поперечного сечения:

$$\beta = \frac{2F_{\Sigma}}{pL},$$

где  $F_{\Sigma}$  – суммарная сила, действующая на одну половину контура тела. Средняя степень силовой компенсации по всему жилету равна

$$\beta_0 = \frac{1}{H} \int_0^H \beta dy \approx \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \beta_i h,$$

где  $h$  – шаг разбиения;  $H_T$  – высота камеры.

Зависимости  $\beta_0$  от относительной ширины камеры  $\bar{b}$  иллюстрирует рис. 9.

Как видно,  $\beta_0$  также, как и  $\delta_0$ , благоприятным образом изменяется с ритмом дыхания:  $\beta_0$  максимальна при полном вдохе (44,2% при  $p=50$  кПа,  $\bar{b}=1$ );  $\beta_0$  минимальна при полном выдохе (24,1% при  $p=50$  кПа,  $\bar{b}=1$ ). Это способствует лучшему сжатию легких, когда давление в них максимально. Хотя  $\beta_0$  меньше 50%, однако, среднее давление на тело 12...22,1кПа все равно превышает избыточное давление в линии дыхания, для высоты 20-

22 км. По той же причине, что и  $\delta_0$ , величина  $\beta_0$  практически не зависит от давления в камере.

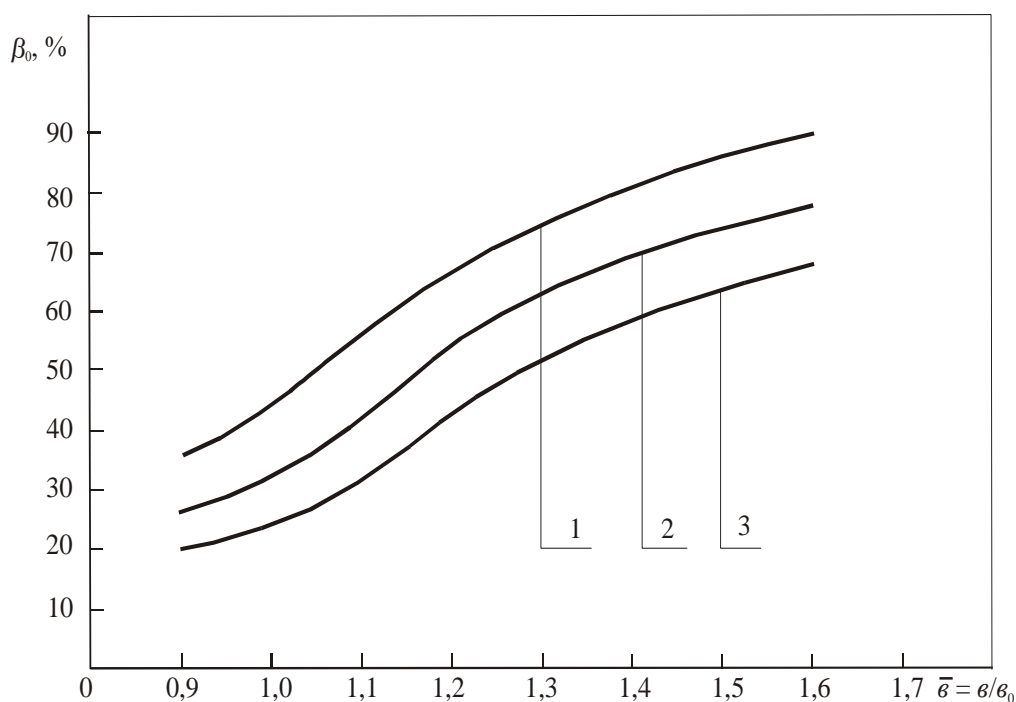


Рис 9 Зависимости средней степени силовой компенсации по всему жилету ( $\beta_{cp}^0$ ) от относительной ширины камеры: 1 – полный вдох; 2 – свободное дыхание; 3 – полный выдох ( $p=50$  кПа)

Для участка в области проймы можно только грубо оценить степень силовой компенсации. Усредненные оценки по верху жилета дают  $\beta_0 \approx 20,5\% - 42\%$ , т.е. значения довольно близкие к приведенным выше для нижней части жилета.

Следует отметить также, что у ВКК-15К, при тех же размерах камеры, параметр  $\beta_0$ , как и опорная степень компенсации  $\delta_0$ , получается на 5-6% ниже, чем у ЖК-6. По той же причине что и  $\delta_0$ , величина  $\beta_0$  практически не зависит от давления в камере.

Увеличение ширины камеры приводит к увеличению  $\beta_0$ , также и как и  $\delta_0$ , благодаря уменьшению открытых участков тела и увеличению натяжения боковых перемычек. При  $\bar{b}=1,6$  величина  $\beta_0$  достигает 67,5...90% в зависимости от глубины дыхания. Уменьшение ширины центральной перемычки и поднятие верха камеры до ключиц дает повышение  $\beta_0$  еще на 3-3,5%. Таким образом, на жилете данной конструктивной схемы можно максимально получить  $\beta_0$  до 93%.



## **Выводы**

1. Разработана математическая модель, методика, алгоритм расчета геометрических параметров ВКЖ с плоской камерой в рабочем состоянии, распределение давления на тело летчика и напряжений (погонных сил) в силовой оболочке.

2. С использованием антропометрических данных проведены расчеты защитных характеристик жилета ЖК-6 в зависимости от регулируемых параметров и показано, что максимальные погонные силы сосредоточены в верхнем участке чехла и боковых перемычках силовой оболочки.

3. Опорная и силовая степени компенсации возрастают с увеличением глубины вдоха, обеспечивая максимальное обжатие тела в фазе полного вдоха, когда избыточное давление в легких также максимально, что способствует лучшей защите легких от чрезмерного растяжения.

4. ЖК-6, изготовленный из малорастяжимой ткани армалон с камерой базовой ширины (как у серийных высотно-компенсирующих костюмов ВКК-15К) может обеспечить опорную степень компенсации в пределах 62...67% и силовую – 24,1...44,2%, в то время как у ВКК-15К указанные величины на 4-5% ниже.

5. Коэффициент запаса прочности жилета определяется прочностью бокового шва и при применении ткани армалон для максимального избыточного давления в камере составляет 4,1 при допустимом значении 2.

## **Библиографический список**

1. Зотов В.А. Компенсирующие жилеты для экипажей высотных самолетов, дисс. к.т.н., МАИ (ГТУ), 2007 г., 157 с.

2. Алексеев С.А. Основы общей теории мягких оболочек // Расчет пространственных конструкций. – М.: Стройиздат, 1966, Вып.11, с.31-52.

3. Ридель В.В., Гулий Б.В. Динамика мягких оболочек. – М.: Наука, 1980 –205 с.

4. Аверьянов А.А. Исследование и разработка противоперегрузочного костюма (ППК) нового поколения, 2005г., дисс. к.т.н., 186 с., ил. МАИ (ГТУ).

5. Шапошников А.И. Исследование основных конструктивных схем высотного кислородного прибора с повышенным давлением и компенсирующей одежды, 1955 г., дисс. к. т. н. , 308с. ил. НИИ Авиаци. медиц. МО СССР.

Газетдинов Рустем Галятдинович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., 125933, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, 4, МАИ, 499-158-47-32; e-mail: rustem-tazetdinov@yandex.ru

Зотов Владимир Анатольевич, главный конструктор Закрытого акционерного общества «Научно-производственное объединение «Динафорс», к.т.н., , 127287, Москва, Старый Петровско-Разумовский проезд, 1/23, ЗАО «НПО «Динафорс», 495-727-10-51, e-mail: skb@dynaforce.ru

Тибрин Геннадий Серафимович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., , 125933, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, 4, МАИ, 499-158-47-32; e-mail: goltibrin@yandex.ru