2. В работе Л. И. Слепяна [2] предложена другая схематизация тех же процессов – с иным по физической природе замыкающим условием на фронте разрушения и с иной моделью для описания разрушенного материала.

В работе [4] решена конкретная задача в двух вариантах: с использованием схемы из [2] и схемы, являющейся комбинацией замыкающего условия из [1] и уравнений, описывающих разрушенный материал, взятых из схемы [2], и проведено сравнение результатов. Получен вывод о невозможности при сопоставлении их с экспериментом сделать выбор из двух решений.

На основе применения уравнений для разрушенной среды из [2] для анализа решения задачи из работы Л. А. Галина и Г. П. Черепанова [3] сделан критический вывод о некорректности этого решения.

3. В настоящей работе показано, что: 1) математическая модель разрушенного материала из работы [2] неприемлема; 2) использование полной модели из [2] (замыкающее соотношение и модель разрушенного материала) приводит к физически неприемлемым результатам – допускает решение задачи с разрушением при напряжениях, строго меньших, чем разрушающие; 3) критика работы [3], данная в работе [4], неверна.

4. В книге Г. П. Черепанова [5], опубликованной через шесть лет после работы [2], предложена новая общая теория обсуждаемых здесь процессов; подвергнуто критике замыкающее соотношение из [1]; ранее изученная в [1] задача о взрыве рассмотрена в рамках этой общей теории; приведено решение задачи из [3] о самоподдерживающемся разрушении без обсуждения в рамках этой общей теории.

5. В настоящей работе показано, что: 1) новая общая теория из [5] отличается от схемы из [1] заменой замыкающего соотношения на фронте разрушения из [1] на замыкающее соотношение Л. И. Слепяна из [2], при этом никаких ссылок на [2] автором [5] не сделано; 2) имеющаяся в [5] критика замыкающего соотношения из [1] несостоятельна; 3) рассмотрение задачи о взрыве в [5] на базе новой общей теории непоследовательно с точки зрения логики действий, предписываемых этой теорией; 4) рассмотрение в [5] задачи о самоподдерживающемся разрушении непоследовательно с точки зрения новой общей теории.

Далее в настоящей работе проведено исследование решения последней задачи в рамках новой общей теории и установлены неединственность решения и наличие у решения качественных свойств, противоречащих естественным априорным представлениям о характере решения; построено решение этой задачи в рамках схемы из [1], решение это единственно и согласуется с указанными представлениями.

6. Предложенные Л. И. Слепяном и Г. П. Черепановым «усовершенствования» схемы из [1] (в частности, замыкающего соотношения на фронте разрушения) неудовлетворительны – они порождают неединственность и неприемлемые (с точки зрения физики явления) свойства решений конкретных задач.

Поступила 18 VIII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. *Григорян С. С.* Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород. ПММ, 1967, т. 31, вып. 2.
2. *Слепян Л. И.* О волне хрупкого разрушения. Инж. ж. МТТ, 1968, № 4.
3. *Галин Л. А., Черепанов Г. П.* О самоподдерживающемся разрушении напряженного хрупкого тела. Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 3.
4. *Слепян Л. И., Троянкина Л. В.* Разрушение хрупкого тела при продольном ударе. Инж. ж. МТТ, 1969, № 2.
5. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. М., «Наука», 1974.

УДК 539.375

О МОДЕЛЯХ В ТЕОРИИ ВОЛН ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ

Л. И. СЛЕПЯН

(*Ленинград*)

В известных автору работах волна хрупкого разрушения рассматривается как движущаяся поверхность, разделяющая сплошную среду на две части: в первой материал находится в исходном (не разрушенном) состоянии, во второй – разрушен, т. е. подчиняется другому уравнению состояния. Для описания движения волны разрушения и определения скоростей и напряжений перед и за волной недостаточно указать уравнение состояния разрушенной среды. Необходимо наряду с условиями на внешних границах тела и общими законами сохранения задать (найти) дополнительное условие, например силовое или энергетическое условие разрушения. В различных работах свойства разрушенного материала и дополнительное условие постулируются по-разному.

Авторы	Разрушенный материал	Дополнительное условие
Х. М. Алиев [1]	Идеальная несжимаемая жидкость	Силовое
Л. А. Галин, Г. П. Черепанов [2]	Свойства не определены	Скорости волны разрушения и волны в неразрушенном материале равны
С. С. Григорян [3]	Идеально пластичное тело	Силовое
Л. И. Слепян [4]	Идеальная сжимаемая жидкость	Энергетическое
Л. И. Слепян, Л. В. Троянкина [5]	Идеальная сжимаемая жидкость, упругое тело с меньшим модулем сдвига	Энергетическое, силовое
Г. П. Черепанов [6]	Упругопластическое тело	Энергетическое, условие из [2]

В работе [5] указывалось на противоречивость работы [2], в [6] критиковалась теория [3] и, наконец, в статье С. С. Григоряна, помещенной выше, критикуются работы [2, 4–6], рассматриваемые им как ошибочная ревизия его теории, опубликованной в [3].

Основное утверждение С. С. Григоряна состоит в том, что энергетическое условие, предложенное в [4] и затем в [6], неудовлетворительно. Ниже разбирается этот, а также и другие вопросы, поднятые в статье С. С. Григоряна, и, кроме того, выясняется, насколько общим является силовой критерий, предложенный Х. М. Алиевым [1] и С. С. Григоряном [3]. Так же, как и в статье С. С. Григоряна, ограничимся рассмотрением плоских волн (плоской деформации), что достаточно для выяснения указанных вопросов.

1. О критериях разрушения. Пусть в процессе распространения волны разрушения тело разделяется на три области, состояние в каждой из которых характеризуется плотностью ρ, массовой скоростью v и напряжениями σ_x, σ_n (полагаем для простоты тело изотропным и нагруженным так, что различаются лишь две компоненты нормальных напряжений: в площадках, параллельных направлению распространения волны (σ_n) и перпендикулярных ему (σ_x)).

Заданным параметрам, соответствующим невозмущенной области $x>S_0(t)$, $S_0^{\cdot}\geqslant 0$, приписываем индекс 0; области, где существуют возмущения, но отсутствуют разрушения $S_1(t)<x<S_0(t)$, $S_1^{\cdot}=V\geqslant 0$ – индекс 1; области, заполненной разрушенным материалом, $0<x<S_1(t)$ – индекс 2 ($S^{\cdot}=dS/dt$).

Имеем, таким образом, 10 неизвестных, для определения которых служат: законы сохранения на разрывах напряжений S_0, S_1 – 4; уравнения состояния исходного и разрушенного материалов $\sigma_x(\rho)$, $\sigma_n(\rho)$ – 4; граничное условие при $x=0$, например σ_{x2} или v_2; итого – 9 соотношений. Необходимо одно дополнительное соотношение – критерий разрушения. Вообще говоря, безразлично, что взять в качестве критерия: задав (непротиворечиво) соотношение между напряжениями $f(\sigma_x, \sigma_n)=\sigma_*$ как предел при $x\to S_1+0$, определяем тем самым все параметры и, кроме того, энергию, «потерянную» при переходе через волну разрушения – «энергию разрушения» D; задав D, найдем σ_*. Как и в любой другой области механики описания, основанные на понятиях силы и энергии, по существу, эквивалентны.

Конечно, если полагать, что при изменяющихся условиях (например, скорости удара) $\sigma_*=\mathrm{const}$, то количественные результаты будут иными, чем при предположении $D=\mathrm{const}$, но основные черты процесса сохраняются. Почему же С. С. Григорян при анализе следствий из «новой общей теории» Г. П. Черепанова [6] обнаружил неединственность и странные свойства решений, основанных на энергетическом критерии? Нетрудно заметить причину: в отличие от анализа следствий своей теории, им не привлекалось уравнение состояния разрушенного материала.

Трудно понять, почему С. С. Григорян прошел мимо решений [4, 5], которые основаны на энергетическом критерии и в которых, несмотря на это, отсутствуют свойства, «плохо вяжущиеся с априорными интуитивными представлениями», отмеченные им при анализе следствий из [6]. Ссылка на «неверную схематизацию разрушенного материала» неубедительна. Столь же непротиворечивые результаты получились бы и при использовании других уравнений состояния, в частности, того, которым пользуется С. С. Григорян. Так что дело здесь вовсе не в энергетическом критерии.

Свойства разрушенного материала не учитываются и в статье [2], где постулируется равенство $S_1^{\bullet}=S_0^{\bullet}$. Из полученных в [2] результатов следует, что плотность разрушенного материала при отсутствии напряжений больше плотности материала в исходном состоянии. Заметим, что здесь речь идет не о пористых или других материалах, уплотняющихся при разрушении. Если же принять, как это сделано в [4, 5], что указанные плотности совпадают (или что $\rho_2<\rho_0$), и сохранить равенство $S_1^{\bullet}=S_0^{\bullet}$, то придем к противоречию с законами сохранения — указанное равенство ошибочно. Поэтому ошибочны и замечания С. С. Григоряна «критика работы [2] (нумерация наша), данная в работе [5], неверна», «предположения о свойствах разрушенной среды взяты из [4], а не из [2]!». В [2] указанные свойства вообще не учитывались.

Какому же из обсуждаемых критериев следует отдать предпочтение? На первый взгляд, кажется, что силовое условие безупречно, его легко установить из опыта и оно более стабильно, чем энергетическое. Все это действительно было бы так, если бы параметры макропроцесса изучались совместно со структурой волны разрушения. Но так как в рассматриваемых работах этого не делается, силовой критерий становится ненадежным: возможная пульсация напряжений, не учитываемая макротеорией, может привести к существенному снижению (осредненных) макронапряжений, при которых материал разрушается. Данному вопросу отведено значительное место в [5], к нему же вернемся ниже.

Здесь же заметим следующее. В случае сферической симметрии, когда при удалении от волны разрушения ($x>S_1$) напряжения падают и перестают быть разрушающими, силовой критерий представляется логически непротиворечивым и, возможно, на его основе получаются практически приемлемые результаты. В случае же плоской волны положение иное. Как показано в [3–5], впереди волны разрушения излучается волна напряжений, причем по [3], где принят силовой критерий, ее интенсивность в области $S_1<x<S_0$ отвечает критерию разрушения. Почему же материал там не разрушается? Можно было бы, конечно, переформулировать критерий, положив, что разрушение происходит не при $f(\sigma_x, \sigma_n)=\sigma_*$, а при $f(\sigma_x, \sigma_n)>\sigma_*$. Однако, хотя бы из-за неравномерности прочности любого реального материала, теория, результаты которой зависят от подобных различий в формулировке критерия, вряд ли может быть признана безупречной.

Ввиду сказанного силовой критерий, сформулированный в [1, 3], по крайней мере применительно к плоской волне, представляется сомнительным. Конечно, энергетический критерий также может быть подвергнут критике на том основании, что не вполне ясно, как определить величину энергии разрушения, к тому же она может зависеть от различных обстоятельств, например от скорости удара. Но аналогичная зависимость может иметь место и в отношении критической комбинации макронапряжений. Указанная трудность, к сожалению, не устраняется простой переформулировкой критерия разрушения.

Приведенные соображения свидетельствуют о том, что ни старой, ни новой «общей теории» пока еще не создано. Ввиду этого в [5] проводилось сопоставление с экспериментом решений, основанных как на энергетическом, так и на силовом критериях. Подчеркнем, что при этом сравнивались не схемы С. С. Григоряна и авторов [5], а критерии разрушения при фиксированных уравнениях состояния.

На этом можно было бы и закончить. Однако автор считает уместным наряду с описанием состояния теории предложить здесь некоторое развитие представлений о волнах хрупкого разрушения, что, в частности, позволит сделать выводы, имеющие непосредственное отношение к обсуждавшимся выше вопросам.

2. Возможная структура волны разрушения и ее влияние на макропараметры. В [4, 5] в качестве энергии разрушения D принята предельная (по прочности материала) энергия формоизменения D_0. Нижняя граница для энергии разрушения, следующая из силового критерия С. С. Григоряна [3], при прочих равных условиях больше чем D_0, причем D растет с ростом σ_{x2}. Разность между скоростью волны напряжений в разрушенном материале и скоростью волны разрушения c_v-V, от которой в некоторых случаях существенно зависит процесс разрушения [5], уменьшается с уменьшением D. Ниже показано, что D может быть даже меньше D_0 и тем самым c_v-V может еще более отличаться (в меньшую сторону) от результата, следующего из силового критерия [3].

Пусть при $t=0$, $x>0$ напряжения и скорости отсутствуют, а в момент $t=0$ создается нормальное сжимающее напряжение $\sigma_x=\sigma>\sigma_*$, действующее в сечении $x=0$ и остающееся в дальнейшем постоянным (полагаем сжимающие напряжения положительными). Будем предполагать, что существует время выдержки τ, возможно зависящее от σ, в течение которого разрушения не происходит и, следовательно, вначале, при $t<\tau$ вдоль оси x будет распространяться волна напряжений интенсивности σ. До тех пор, пока нас не интересуют размеры частиц, на которые распадается материал при разрушении, величина τ может не определяться, так как она пропадает при вычислении макропараметров. Полагаем далее, что в момент $t=\tau$ от точки $x=0$, где время выдержки закончилось, с некоторой скоростью V_* начинает распространяться волна разрушения, изменяющая напряжения скачком до значения $\sigma_2<\sigma$. Будем считать, что при разрушении материал не уплотняется: $\sigma_2 \geqslant 0$ при $\rho_2=\rho_0$. Из законов сохранения следует

$$c=\sqrt{\frac{\rho_1\sigma}{\rho_0(\rho_1-\rho_0)}},\qquad V_*=v_1+\sqrt{\frac{\rho_2(\sigma-\sigma_2)}{\rho_1(\rho_1-\rho_2)}}=$$

$$=c\left[1-\frac{\rho_0}{\rho_1}\left(1-\sqrt{\frac{(1-\sigma_2/\sigma)(1-\rho_0/\rho_1)}{\rho_0/\rho_2-\rho_0/\rho_1}}\right)\right] \tag{1}$$

Здесь c – скорость волны σ в неразрушенном материале, а значение ρ_2 пока произвольно. Однако из предположения $\sigma_2<\sigma$ следует, что $\rho_2 \leqslant \rho_1$. Из (1) видно, что при $\rho_2=\rho_1$ скорость $V_*=\infty$, а при $\rho_2=\rho_0$ $V_* \leqslant c$. Вместе с тем $V_* \geqslant c$, так как в противном случае материал при $x>0$ не разрушался бы под действием напряжений $\sigma>\sigma_*$ в течение времени $t>\tau$, что противоречит исходному предположению.

Таким образом, независимо от конкретного вида уравнения состояния разрушенного неуплотняющегося материала

$$c \leqslant V_* \leqslant \infty \tag{2}$$

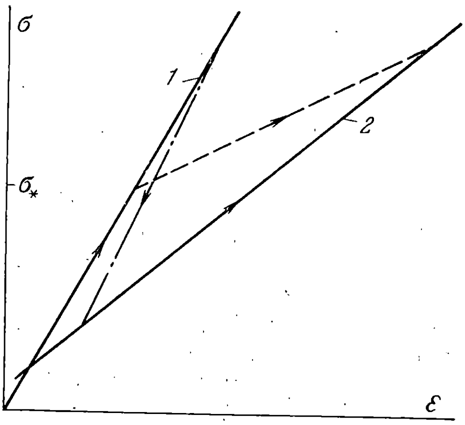
Что касается энергии сверхзвукового разрушения D_*, то очевидно, что она изменяется в пределах

$$0 \leqslant D_* \leqslant u_1(\sigma)-u_2(\sigma_2) \tag{3}$$

($u_{1,2}$ – энергия деформации) вместе с изменением V_* (2). В действительности, конечно, $D_*>0$, причем нижним пределом для нее служит энергия образования новых поверхностей. При этом $V_*>c$.

Итак, волна сверхзвукового разрушения распространяется автономно (независимо от того, поддерживается ли постоянным напряжение при $x=0$, $t>\tau$) и при

$$t=t_0=V_*\tau/(V_*-c),$$
$$x=x_0=V_*c\tau/(V_*-c) \tag{4}$$



догоняет фронт волны σ, после чего разрушение прекращается. В этот момент, как следует из непрерывности напряжений и скоростей при $x=x_0$, $t>t_0$, в область $x>x_0$ излучается волна напряжений σ_1. Для простоты предположим, что напряжение σ_2 достаточно мало (на фигуре видно, что σ_2 может быть много меньше чем σ_*), так что $\sigma_1<\sigma_*$. В противном случае через интервал времени $\tau(\sigma_1)$ разрушение начнется вновь, до прихода волны σ по разрушенному материалу. Ввиду того, что при $x=0$ поддерживается напряжение $\sigma>\sigma_*$, разрушение начнется снова в момент

$$t=t_*+2\tau,\qquad t_*=\frac{x_0}{c_v}=\frac{c}{c_v}\frac{V_*\tau}{V_*-c} \tag{5}$$

Здесь $c_v<c$, c_v – скорость распространения волны σ в разрушенном материале, t_* – время ее распространения.

Основываясь на приведенных рассуждениях, можно описать установившийся процесс разрушения, основные черты которого сводятся к следующему. Волна разрушения движется периодически: покоится в течение времени

$$t_1=\tau\left(1+\frac{c}{c_v}\frac{V_*-c_v}{V_*-c}\right) \tag{6}$$

и движется со скоростью $V_*>c$ в течение времени

$$t_2=c\tau/(V_*-c) \tag{7}$$

Напряжение впереди волны разрушения

$$\sigma_1 \geqslant \sigma_* \quad (nT<t<nT+V_*\tau/(V_*-c))$$

$$\sigma_1 < \sigma_* \qquad \left(nT + \frac{V_* \tau}{V_* - c} < t < (n+1)T \right) \tag{8}$$

$$T = t_* + \tau = t_1 + t_2 = 1 + \frac{cV_*}{c_v(V_* - c)} \qquad (n=0, 1, \ldots)$$

Позади волны разрушения напряжение и массовая скорость колеблются около средних значений: за период $T_1 = \tau + 2t_*$ (с точки зрения неподвижного наблюдателя) каждый из указанных параметров принимает по три значения, определяемых волной σ, движущейся по разрушенному материалу в сторону волны разрушения, и волнами, излучаемыми в противоположном направлении. Можно предполагать, что вследствие рассеяния энергии указанные колебания будут затухать при удалении от волны разрушения, так что с их отражениями от сечения $x=0$ можно не считаться. Путь, проходимый материалом на плоскости $\sigma-\varepsilon$ (ε – деформация сжатия), показан на фигуре, где *1* – неразрушенный материал, *2* – разрушенный, пунктир – по С. С. Григоряну [3], штрихпунктир – по предлагаемой схеме.

Средняя скорость волны разрушения за цикл $T = t_* + \tau$

$$V = \frac{x_0}{T} = c_v \Big/ \left(1 + \frac{V_* - c}{V_*} \frac{c_v}{c} \right) \tag{9}$$

Ввиду того, что $c < V_* \leqslant \infty$

$$\frac{c_v}{1 + c_v/c} \leqslant V < c_v \tag{10}$$

Видно, что с уменьшением скорости на «микроуровне» V_* «макроскорость» V увеличивается, оставаясь меньше, чем скорость волны напряжений в разрушенном материале. Что касается волны, излучаемой в неразрушенный материал, то наблюдатель, находящийся на расстоянии от волны разрушения $l > cV_*\tau/(V_* - c)$ (на макроуровне – просто впереди волны разрушения), обнаружит волну напряжений $\sigma_1 < \sigma_*$, так как периодически появляющаяся в l-окрестности волны разрушения упругая волна большей интенсивности поглощается сверхзвуковой волной разрушения.

Полная энергия разрушения D включает, кроме энергии сверхзвукового разрушения D_* разность между истинными значениями кинетической энергии и энергии деформации разрушенного материала и соответствующими значениями, определяемыми осредненными скоростями и деформациями. Энергия разрушения D легко подсчитывается после определения напряжений σ_1, так как при этом полностью определен процесс на макроуровне.

После привлечения уравнения состояния разрушенного материала остается еще известный произвол в выборе значения одного из параметров: σ_2, V_* или энергии сверхзвукового разрушения D_*. Устранить этот произвол можно, по-видимому, лишь используя данные опытов. Однако полученных результатов достаточно, чтобы сделать некоторые выводы относительно макропараметров процесса разрушения.

1. Скорость волны разрушения имеет не только верхнюю (равную c_v), но и нижнюю границу (10), на что указывалось и в [5] (из работы [3] следует возможность произвольно малого значения V).

2. Предел для напряжений при приближении к волне разрушения из неразрушенного материала меньше значения разрушающих напряжений. Заметим, что при уменьшении энергии сверхзвукового разрушения V_*, σ_1 уменьшаются, V увеличивается. То же происходит и при увеличении σ, если энергия D_* фиксирована.

Предположим теперь, что напряжения σ уменьшаются и становятся немного меньше чем σ_*. Тогда при достижении волной σ границы S_1 напряжения при $x < S_1$ возрастут вследствие того, что неразрушенный материал более жесткий чем разрушенный. В результате напряжения при $x = S_1$ могут превзойти σ_*, и разрушение начнется вновь.

3. Разрушение может продолжаться некоторое время и после того, как осредненные напряжения за волной разрушения станут меньше разрушающих. Данный вывод вместе с количественной оценкой был сделан в [5]. Замечание С. С. Григоряна о том, что этот вывод «физически неприемлем», неверно.

Подчеркнем, что приведенные выше выводы получены на основе силового критерия, но применением его лишь на «микроуровне».

3. Об уравнениях состояния разрушенного материала. В рассматриваемых работах, как указывалось вначале, предлагались различные идеализированные соотношения для разрушенного материала. В частности, пренебрегая сдвиговым сопротивлением разрушенного материала, авторы [4, 5] руководствовались целью изучить явление на наиболее простой модели и, как видно из [4, 5], не считали такую модель единственно возможной. Что касается учета трения, пропорционального нормальному давлению, путем сохранения остаточного модуля сдвига, то в [5] дано этому необходимое пояснение. Заметим только, что неучитываемые при этом необратимые потери энергии (помимо учтенной потери из-за падения модуля сдвига) происходят в условиях задачи из [5] в той области, сигналы из которой не догоняют волны разрушения до ее остановки, и, следовательно, указанные потери на разрушение не влияют.

Истинные свойства раздробленного материала достаточно сложны и, наверное, нельзя считать общей ни одну из упомянутых моделей. В частности, существенной может оказаться меньшая плотность разрушенного материала, обнаруживающаяся после разгрузки. Что же касается необходимости учета тех или иных свойств разрушенного материала, то это определяется конкретными условиями задачи и целями исследования.

Поступила 4 X 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алиев Х. М.* Ударная волна разрушения в хрупких средах. Докл. АН СССР, 1963, т. 151, № 1.
2. *Галин Л. А., Черепанов Г. П.* О самоподдерживающемся разрушении напряженного хрупкого тела. Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 3.
3. *Григорян С. С.* Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород. ПММ, 1967, т. 31, вып. 4.
4. *Слепян Л. И.* О волне хрупкого разрушения. Инж. ж. МТТ, 1968, № 4.
5. *Слепян Л. И., Троянкина Л. В.* Разрушение хрупкого стержня при продольном ударе. Изв. АН СССР. МТТ, 1969, № 2.
6. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. М., «Наука», 1974.

УДК 533.6.013.42

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЯГКОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Н. П. СТРЕКОЗОВ, В. И. ХАРЧЕНКО

(Москва)

В нелинейной постановке рассматривается взаимодействие осесимметричных мягких оболочек с воздушным потоком большой скорости. Впервые задача об обтекании мягкой оболочки потенциальным потоком невязкой несжимаемой жидкости была поставлена и решена в [1, 2]. На основании результатов продувок недеформированных и слабо деформированных сфер в работе [3] построено теоретическое решение задачи по определению смещений мягкой оболочки, имеющей форму сферического сегмента. В предлагаемой статье изложены постановка и результаты экспериментов по определению аэродинамических нагрузок по деформированному профилю мягкой оболочки. Теоретическое исследование основано на безмоментной теории для больших смещений и значительных относительных деформаций. Полученные аналитические зависимости сопоставлены с экспериментом.

1. Методика эксперимента. Для исследования распределения воздушного давления по поверхности мягкой надувной сферы были поставлены специальные эксперименты в аэродинамической трубе. Изучалось обтекание потоком воздуха большой скорости при нулевом угле атаки и различных соотношениях внутреннего давления и скоростного напора сферических моделей, силовые оболочки которых имели меридиональный раскрой и были выполнены из капроновой ткани.

На фиг. 1 представлен разрез мягкой дренированной модели, собранной из 15 лепестков, и жесткой шайбы в вершине. При продувках оболочки крепились на специальных стойках посредством хвостовых державок так, чтобы сечения дренажа на сфере располагалось в экваториальной плоскости. Наполнение оболочек производилось из магистрали высокого давления через редуктор и ресивер. Контроль давления внутри оболочки осуществлялся визуально с помощью образцового манометра и