

Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. III

К.т.н. В.М. Жгутов*,

ООО «Архитектурно-строительная компания «Китеж»

В предыдущих работах [1, 2] были рассмотрены оболочки общего вида, находящиеся под действием механической нагрузки при определенном закреплении их контура. При этом предполагалось, что оболочки могут быть подкреплены ребрами жесткости, расставленными вдоль координатных линий (направленных по линиям кривизны) с внутренней стороны оболочки.

В работах [1, 2] предложена математическая модель деформирования рассматриваемых оболочек при учете геометрической нелинейности, дискретного расположения ребер, их ширины, сдвиговой и крутильной жесткости ребер, поперечных сдвигов и возможной анизотропии (ортотропности) материала. Предложен, кроме того, алгоритм исследования модели, основанный на методе Ритца и итерационных процессах [2–11].

Вычислительный эксперимент был проведен для вариантов I–IV гладких и ребристых пологих изотропных оболочек, представленных в табл. 1 работы [1]. При этом анализируемые оболочки считались выполненными из **металла** (коэффициент Пуассона $\mu=0,3$) и закрепленными по контуру шарнирно-неподвижным способом. Все расчеты были проведены в безразмерных параметрах, описанных в [4, 5, 8–13], удобных для анализа и дальнейшего использования результатов расчета. Для анализируемых оболочек были построены графики «безразмерная нагрузка \bar{P} – безразмерный прогиб \bar{W} » и определены критические нагрузки, соответствующие потере устойчивости (при которой происходит характерное «прощелкивание» или «выпучивание» оболочки).

Были найдены также и размерные значения всех критических нагрузок, отвечающие тому или иному материалу изготовления металлической оболочки (отвечающие тому или иному значению модуля упругости E материала).

В работах [1, 2] был проведен также анализ распределения прогибов и напряжений по полю **металлической** оболочки в процессе изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки от некоторого «нулевого» до определенного «конечного» состояния. Были даны соответствующие графические интерпретации. Исследовались также и условия прочности рассмотренных оболочечных конструкций.

В настоящей статье (на основе предложенных в работах [1, 2] математической модели и алгоритма их исследования) представлены результаты, аналогичные результатам, изложенным в [1, 2]. Именно, приведены данные вычислительного эксперимента, проведенного для гладких и ребристых **полимерных** оболочек, в частности, выполненных из оргстекла (коэффициент Пуассона $\mu=0,354$). Обсуждено условие пологости оболочки. Кроме того, проведено сравнение полученных результатов с результатами натурного эксперимента, выполненного другими авторами [16].

Как и в предыдущих работах [1, 2], вычислительный эксперимент проводился для вариантов пологих оболочек (на прямоугольном плане), представленных в табл. 1. (воспроизведенной из [1]).

Таблица 1. Параметры проанализированных оболочек

Вариант оболочки	Параметры оболочки			Возможные реальные размеры, м		
	Размеры в плане $a = b$	Главные радиусы кривизны $R_1=R_2$	Безразмерные кривизны $K_\xi=K_\eta$	Размеры в плане $a = b$	Главные радиусы кривизны $R_1=R_2$	Толщина h
I	$60h$	$225h$	16	18	67,5	0,3
II	$100h$	$251h$	40	18	45,3	0,18
III	$200h$	$503h$	79,5	18	45,3	0,09
IV	$600h$	$1510h$	238	18	45,3	0,03

Для каждого варианта были рассмотрены гладкие оболочки (число ребер подкрепления $N_p = 0$), а также ребристые оболочки при $N_p = 6$ и $N_p = 18$.

Считалось, что ребра расположены со стороны вогнутости оболочки равномерно и перекрестно, вдоль координатных линий x и y , соответственно по 3 ребра либо по 9 ребер в каждом из указанных направлений.

Высота ребер принималась $3h$; ширина ребер полагалась равной $2h$, $3,3h$, $6,6h$ и $20h$ соответственно для вариантов оболочек I, II, III и IV. Например, для оболочек вариантов I, II, III и IV высота ребер может быть равна соответственно 0,9 м, 0,54 м, 0,27 м и 0,09 м при одной и той же ширине – 0,6 м.

Кроме того, при проведении расчетов предполагалось, что: поперечная нагрузка q равномерно распределена ($q = const$); контур оболочки закреплен шарнирно-неподвижным способом; число членов разложения в методе Ритца $N = 9$.

1. Об условиях пологости оболочек

Обсудим условия пологости оболочек.

По В.З. Власову [14, 15] оболочки являются пологими, если

$$\frac{f}{a} \leq \frac{1}{5}, (1)$$

где $a \leq b$, f – максимальная стрела подъема оболочки (как правило, в ее центре).

По Э. Рейсснеру [15, 17] пологими следует считать оболочки, для которых

$$\frac{f}{a} \leq \frac{1}{8}. (2)$$

Всякий отсек сферической поверхности характеризуется постоянной положительной кривизной (и, соответственно, постоянным радиусом кривизны R) в любой точке и в любом направлении (в этом случае все направления – главные).

Исходя из геометрических соображений очевидно, что для отсчетной поверхности сферической оболочки справедливы равенства

- при $0 < f \leq R$

$$f = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}, \quad a \leq 2R; (3)$$

- при $R < f \leq 2R$

$$f = R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2}, \quad a \leq 2R,$$

которые можно трактовать как формулы для корней квадратного уравнения

$$f^2 - 2Rf + \left(\frac{a}{2}\right)^2 = 0.$$

Из последнего равенства получаем выражение

$$R = \frac{a^2 \left[1 + 4 \left(\frac{f}{a} \right)^2 \right]}{8f} = \frac{a \left[1 + 4 \left(\frac{f}{a} \right)^2 \right]}{8 \left(\frac{f}{a} \right)}. (4)$$

Отсюда следует, что условия (критерии) пологости (1) и (2) для сферических оболочек могут быть переписаны в эквивалентном (и более удобном для практического использования) виде:

- по В.З. Власову

$$\frac{a}{R} \leq \frac{40}{29}; (5)$$

- по Э. Рейсснеру

$$\frac{a}{R} \leq \frac{16}{17}. (6)$$

Заметим, что полученные нами выражение (4) и условия пологости оболочек (5), (6) заметно отличаются от аналогичных соотношений, приведенных в монографии В.В. Петрова, В.К. Иноземцева и Н.Ф. Синевой [15].

Нижеследующие примеры подтверждают справедливость соотношений, предложенных нами.

Пример 1. Рассмотрим оболочки вариантов II, III и IV (см. табл. 1), для которых $R = 45,3$ м и $a = 18$ м.

В соответствии с формулой (3) $f = 45,3 - \sqrt{45,3^2 - \left(\frac{18}{2}\right)^2} \approx 0,9$ м. Следовательно, $\frac{f}{a} \approx \frac{0,9}{18} = 0,05$, что удовлетворяет условиям пологости (1) и (2) для рассматриваемых оболочек. Обратное, соотношение (4) дает $R \approx \frac{18(1 + 4 \cdot 0,05^2)}{8 \cdot 0,05} \approx 45,3$ м. Наконец, $\frac{a}{R} = \frac{18}{45,3} \approx 0,397$, что отвечает обоим критериям пологости в виде (5) и (6).

Из данного примера следует, кроме того, что оболочки варианта I из табл. 1 тем более являются пологими (и по Э. Рейсснеру, и по В.З. Власову).

Пример 2. Пусть теперь оболочка имеет параметры $R = 45,3$ м и $a = \frac{16}{17} \cdot 45,3 \approx 42,64$ м [наибольшее значение

a , соответствующее критерию Э. Рейсснера (2)]. Тогда на основании (3) $f = 45,3 - \sqrt{45,3^2 - \left(\frac{42,64}{2}\right)^2} \approx 5,33$ м, а, значит, $\frac{f}{a} \approx \frac{5,33}{42,64} = 0,125 = \frac{1}{8}$, что отвечает обоим неравенствам (1) и (2). Обратное, по формуле (4)

$R \approx \frac{42,64(1 + 4 \cdot 0,125^2)}{8 \cdot 0,125} \approx 45,3$ м. При этом $\frac{a}{R} = \frac{42,64}{45,3} \approx 0,941 \approx \frac{16}{17}$, что также удовлетворяет неравенствам (5) и (6).

Пример 3. Пусть параметры оболочки $R = 45,3$ м и $a = \frac{40}{29} \cdot 45,3 \approx 62,48$ м [максимально возможное значение a ,

отвечающее критерию В.З. Власова (1)]. В силу (3) получаем, что $f = 45,3 - \sqrt{45,3^2 - \left(\frac{62,48}{2}\right)^2} \approx 12,5$ м и, следовательно, $\frac{f}{a} \approx \frac{12,5}{62,48} \approx 0,2 = \frac{1}{5}$, что удовлетворяет условию В.З. Власова (1), но не удовлетворяет условию

Э. Рейсснера (2). Обратное, по формуле (4) $R \approx \frac{62,48(1 + 4 \cdot 0,2^2)}{8 \cdot 0,2} \approx 45,3$ м. При этом $\frac{a}{R} = \frac{62,48}{45,3} \approx 1,379 \approx \frac{40}{29}$, т.е., данная оболочка является полой по В.З. Власову, но не является таковой по Э. Рейсснеру в силу неравенств (5) и (6) соответственно.

2. Безразмерные критические нагрузки для рассмотренных вариантов полимерных оболочек

На рис. 1, а–в) представлены различные графики «безразмерная нагрузка \bar{P} – безразмерный прогиб \bar{W} » для оболочек варианта I.

Кривые на рис. 1, а) получены для гладкой оболочки, т. е. оболочки без ребер ($N_p = 0$). Кривые на рис. 1, б) и в) – для ребристых оболочек с шестью ($N_p = 6$) и, соответственно, восемнадцатью ($N_p = 18$) ребрами подкрепления.

Всем кривым, относящимся к центральным точкам оболочек, присвоен номер 1, а кривым, построенным для точек, расположенных в четверти, – номер 2. (Для придания большей наглядности кривые 1 выделены красным цветом, а кривые 2 – синим цветом).

Из рассмотрения рис. 1, б) и в) следует, что оболочка, подкрепленная ребрами, устойчивости не теряет.

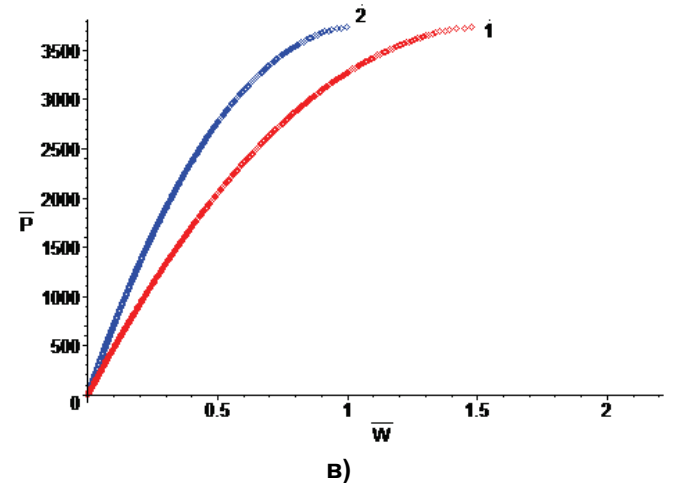
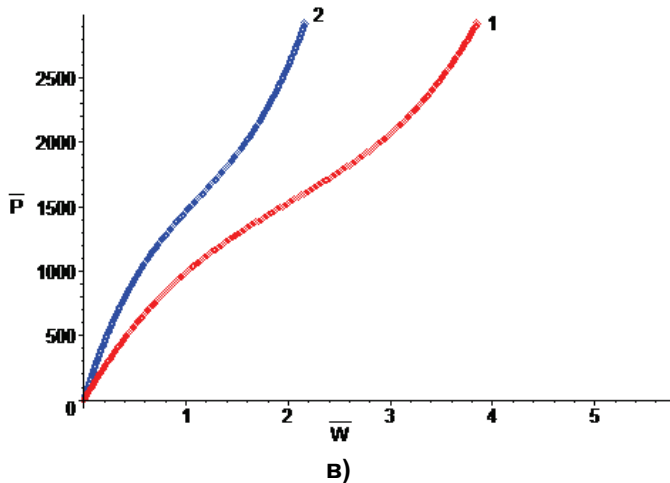
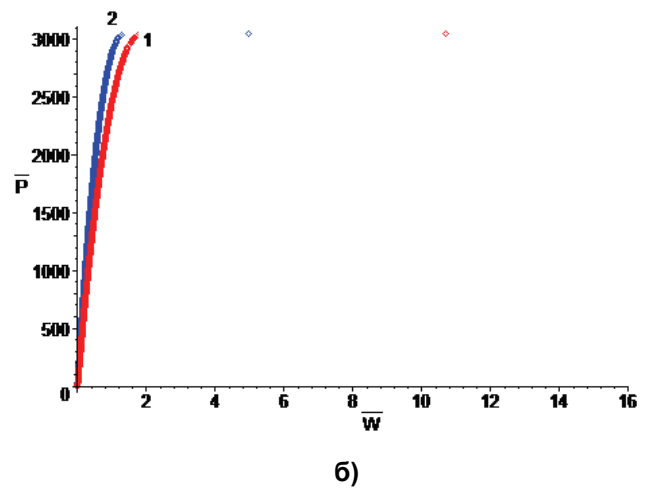
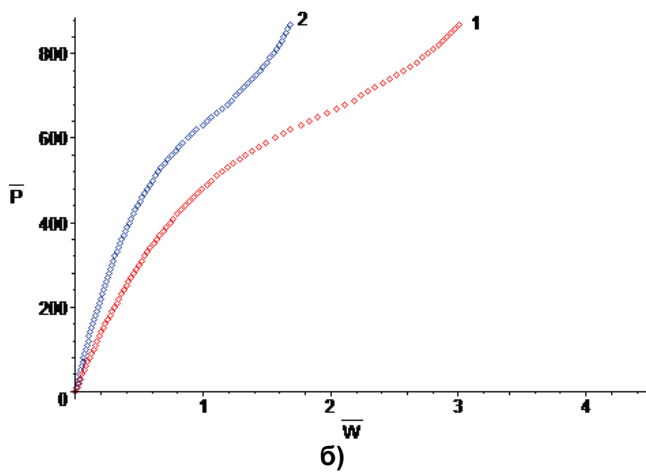
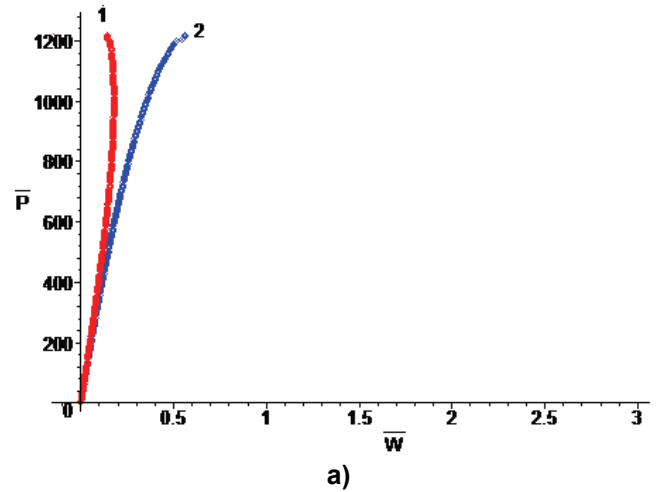
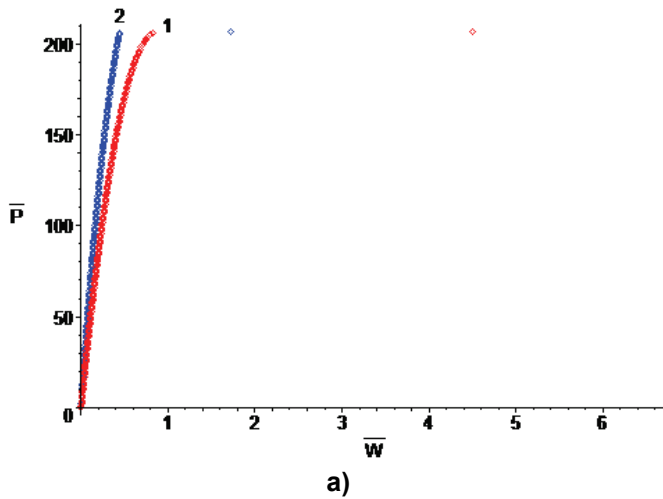
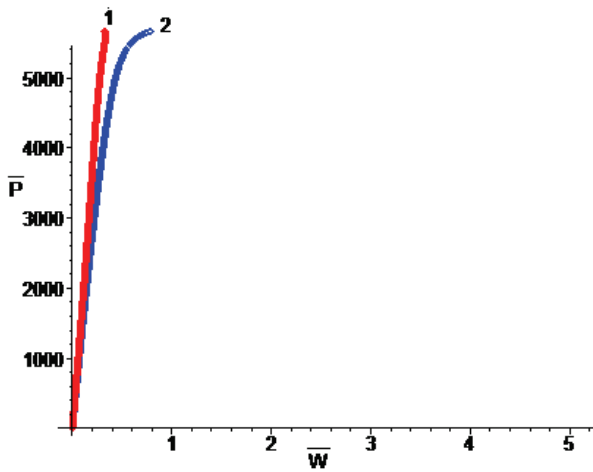
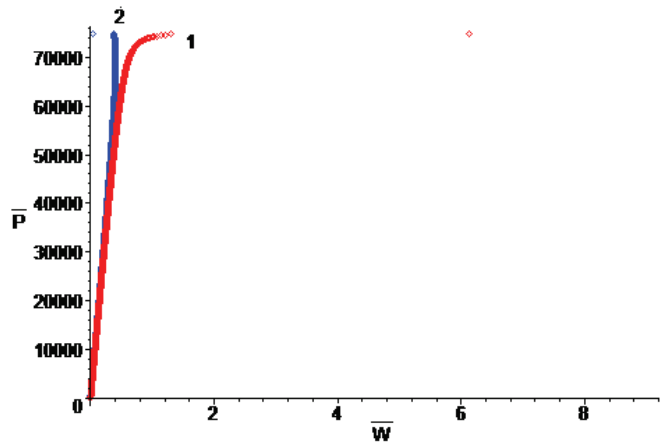


Рисунок 1. Зависимости « $\bar{P} - \bar{W}$ » для оболочек варианта I (выполненных из оргстекла): а – для гладкой оболочки ($N_p = 0$); б – для ребристой оболочки с шестью ребрами подкрепления ($N_p = 6$); в – для ребристой оболочки с восемнадцатью ребрами ($N_p = 18$). Кривые с номером 1 (красного цвета) отвечают прогибу в центре, а кривые с номером 2 (синего цвета) – в четверти оболочки

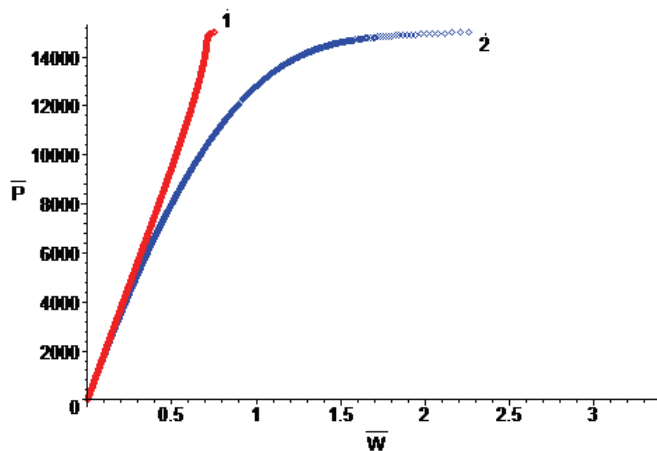
Рисунок 2. Зависимости « $\bar{P} - \bar{W}$ » для оболочек варианта II (выполненных из оргстекла): а – для гладкой оболочки ($N_p = 0$); б – для ребристой оболочки с шестью ребрами подкрепления ($N_p = 6$); в – для ребристой оболочки с восемнадцатью ребрами ($N_p = 18$). Кривые с номером 1 (красного цвета) отвечают прогибу в центре, а кривые с номером 2 (синего цвета) – в четверти оболочки



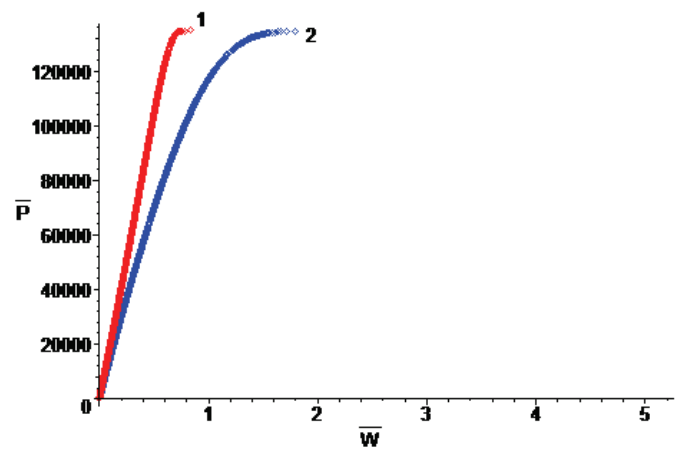
а)



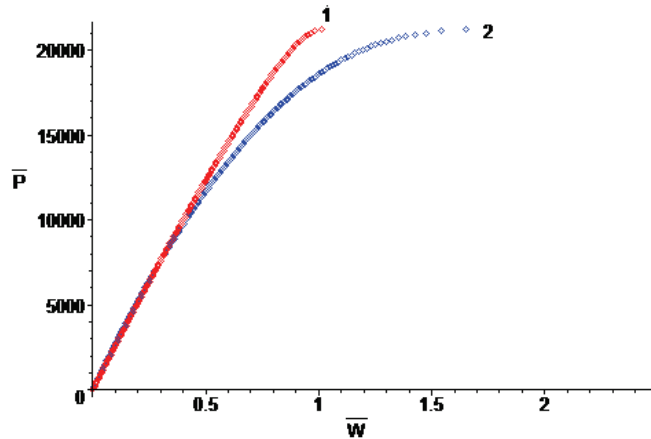
а)



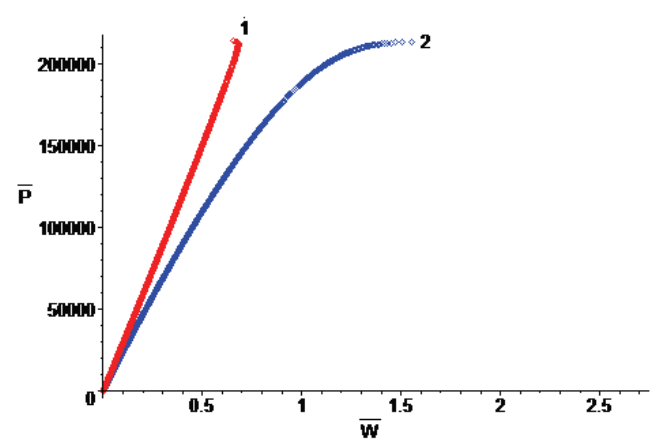
б)



б)



в)



в)

Рисунок 3. Зависимости « $\bar{P} - \bar{W}$ » для оболочек варианта III (выполненных из оргстекла): а – для гладкой оболочки ($N_p = 0$); б – для ребристой оболочки с шестью ребрами подкрепления ($N_p = 6$); в – для ребристой оболочки с восемнадцатью ребрами ($N_p = 18$). Кривые с номером 1 (красного цвета) отвечают прогибу в центре, а кривые с номером 2 (синего цвета) – в четверти оболочки

Рисунок 4. Зависимости « $\bar{P} - \bar{W}$ » для оболочек варианта IV (выполненных из оргстекла): а – для гладкой оболочки ($N_p = 0$); б – для ребристой оболочки с шестью ребрами подкрепления ($N_p = 6$); в – для ребристой оболочки с восемнадцатью ребрами ($N_p = 18$). Кривые с номером 1 (красного цвета) отвечают прогибу в центре, а кривые с номером 2 (синего цвета) – в четверти оболочки

На рис. 2, а–в), рис. 3, а–в) и рис. 4, а–в) представлены аналогичные графики « $\bar{P} - \bar{W}$ », построенные для оболочек вариантов II, III и IV. Номера (и цвета) кривых на рис. 2, 3 и 4, а также литеры рисунков имеют тот же смысл, что и на рис. 1, а–в).

В табл. 2 приведены для вариантов I–IV гладких и ребристых оболочек безразмерные критические нагрузки $\bar{P}_{кр}$, найденные при решении линейно упругой задачи.

Таблица 2. Расчетные значения безразмерной критической нагрузки $\bar{P}_{кр}$ для гладких и ребристых оболочек, выполненных из оргстекла

Вариант оболочки	Значения безразмерной критической нагрузки $\bar{P}_{кр}$ при числе ребер		
	0	6 (3 + 3)	18 (9 + 9)
I	202	–	–
II	1200	2960	3710
III	5610	14900	20900
IV	74000	144800	212800

Решение нелинейных уравнений равновесия осуществляется с использованием метода итераций. При этом находится первая из критических нагрузок (нагрузка, отвечающая смене равновесных состояний, начиная с которой происходит характерное «прощелкивание» или «выпучивание» оболочки).

Для ответа на вопрос о соответствии найденной нагрузки общей или местной потере устойчивости, необходимы дополнительные исследования.

3. Размерные критические нагрузки для рассмотренных вариантов полимерных оболочек

Используем полученные результаты решения задач в безразмерных параметрах для нахождения размерных критических нагрузок $q_{кр}$, соответствующих оргстеклу (как материалу изготовления) и реальным размерам оболочки.

Для перехода к размерным критическим нагрузкам используем зависимость [1]

$$q_{кр} = \frac{Eh^4}{a^4} \bar{P}_{кр}.$$

Примем следующее значение модуля упругости для оргстекла: $E = 0,033 \cdot 10^5$ МПа.

В табл. 3 представлены значения размерных критических нагрузок $q_{кр}$, МПа для различных вариантов гладких и ребристых оболочек, выполненных из оргстекла.

Данные табл. 3 целесообразно применять при проектировании покрытий большепролетных сооружений.

Так, например, рационально выбирая толщину и число подкрепляющих ребер выполненной из данного материала оболочки, можно заведомо надежно обеспечить ее устойчивость при расчетной нагрузке.

Таблица 3. Значения размерных критических нагрузок $q_{кр}$

Материал оболочки	Число ребер	$q_{кр}$, МПа, для вариантов оболочек			
		I	II	III	IV
Оргстекло	0	0,0514	0,0396	0,0116	0,0019
	6 (3 + 3)	–	0,0977	0,0307	0,0037
	18 (9 + 9)	–	0,1224	0,0431	0,0054

Результаты проведенного исследования показывают следующее.

При подкреплении оболочек ребрами жесткости размерные критические нагрузки возрастают в несколько раз. Поскольку вблизи критических нагрузок уровень напряжений для многих материалов может превышать допустимый, при исследовании устойчивости оболочек необходимо проводить проверку условия их прочности. Кроме того, вблизи критических нагрузок напряжения, возникающие в материале оболочки, достигают достаточно высокого уровня. Это обстоятельство может способствовать развитию пластических деформаций или деформаций ползучести (при длительных нагрузках), а также привести к потере прочности.

Жгутов В.М. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. III

Вот почему при проектировании оболочечных конструкций необходимо проводить расчеты на прочность и устойчивость не только в упругой постановке, но и с учетом возможных нелинейно-упругих (пластических) деформаций и деформаций ползучести.

4. Сравнение критических нагрузок, полученных в работе, с результатами натурального эксперимента других авторов

В монографии В.И. Климанова и С.А. Тимашева [16] описаны результаты натуральных экспериментов, выполненных для серии сферических пологих оболочек (из 7 экземпляров), изготовленных из оргстекла.

Оболочки характеризовались реальными размерами $a = b = 0,6$ м и $h = 1,0$ мм при параметре кривизны $R_1 = R_2 = 1,512$ м. При этом имелись некоторые начальные несовершенства формы. Со стороны вогнутости оболочки подкреплялись ортогональной сеткой ребер с размерами $3,3 \times 9,2$ мм. Шаг расстановки ребер составлял 7,5 мм.

Оболочки нагружались равномерно распределенной поперечной нагрузкой (при шарнирно-неподвижном закреплении их контура).

После перехода к безразмерным параметрам имеем: $a = b = 600h$, $R_1 = R_2 = 1512h$, $K_\xi = K_\eta = 238$. Мы видим, что исследованные в работе [16] оболочки практически идентичны оболочкам варианта IV (проанализированными нами) по геометрическим параметрам. Кроме того, близки они и по жесткости подкреплений (оболочкам с $N_p = 18$ в нашем случае).

По данным натурального эксперимента, описанного в [16], разброс значений критической нагрузки $q_{кр}$ для различных экземпляров оболочек составил от $q_{кр} = 0,00417$ МПа до $q_{кр} = 0,00703$ МПа (большой разброс значений $q_{кр}$, полученных в эксперименте, был обусловлен начальным несовершенством формы оболочек). После статистической обработки был принят окончательный результат [16]: $q_{кр} = 0,00497$ МПа.

Из табл. 3 видно, для рассмотренного нами весьма близкого варианта оболочки получено $q_{кр} = 0,0054$ МПа, что хорошо согласуется с результатом, приведенным в [16]. Тем самым подтверждается достоверность результатов, полученных в настоящей работе и предыдущих работах [1, 2].

5. Характер распределения безразмерных прогибов и интенсивностей напряжений по полю оболочки

Поля безразмерных прогибов \bar{W} и безразмерных интенсивностей напряжений $\bar{\sigma}_i$

$$\left(\bar{\sigma}_i = \frac{a^2 \sigma_i}{Eh^2}, \text{ где } \sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \right)$$

для полимерных оболочек приводятся ниже как при небольших (начальных) нагрузках, так и при достаточно больших нагрузках (близких к критическим значениям). Напряжения вычисляются при $z = -h/2$, поэтому $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$.

На рис. 5–7 приведены графики распределения прогибов \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для оболочек варианта I: для гладкой оболочки (рис. 5) и ребристых оболочек с шестью (рис. 6) и восемнадцатью (рис. 7) ребрами подкрепления.

На рис. 8–10, рис. 11–13 и рис. 14–16 представлены аналогичные графики \bar{W} и $\bar{\sigma}_i$ для оболочек вариантов II, III и IV соответственно: для гладких оболочек (рис. 8, 11 и 14) и ребристых оболочек с шестью (рис. 9, 12 и 15) и восемнадцатью (рис. 10, 13 и 16) ребрами.

Анализ полученных результатов показывает следующее.

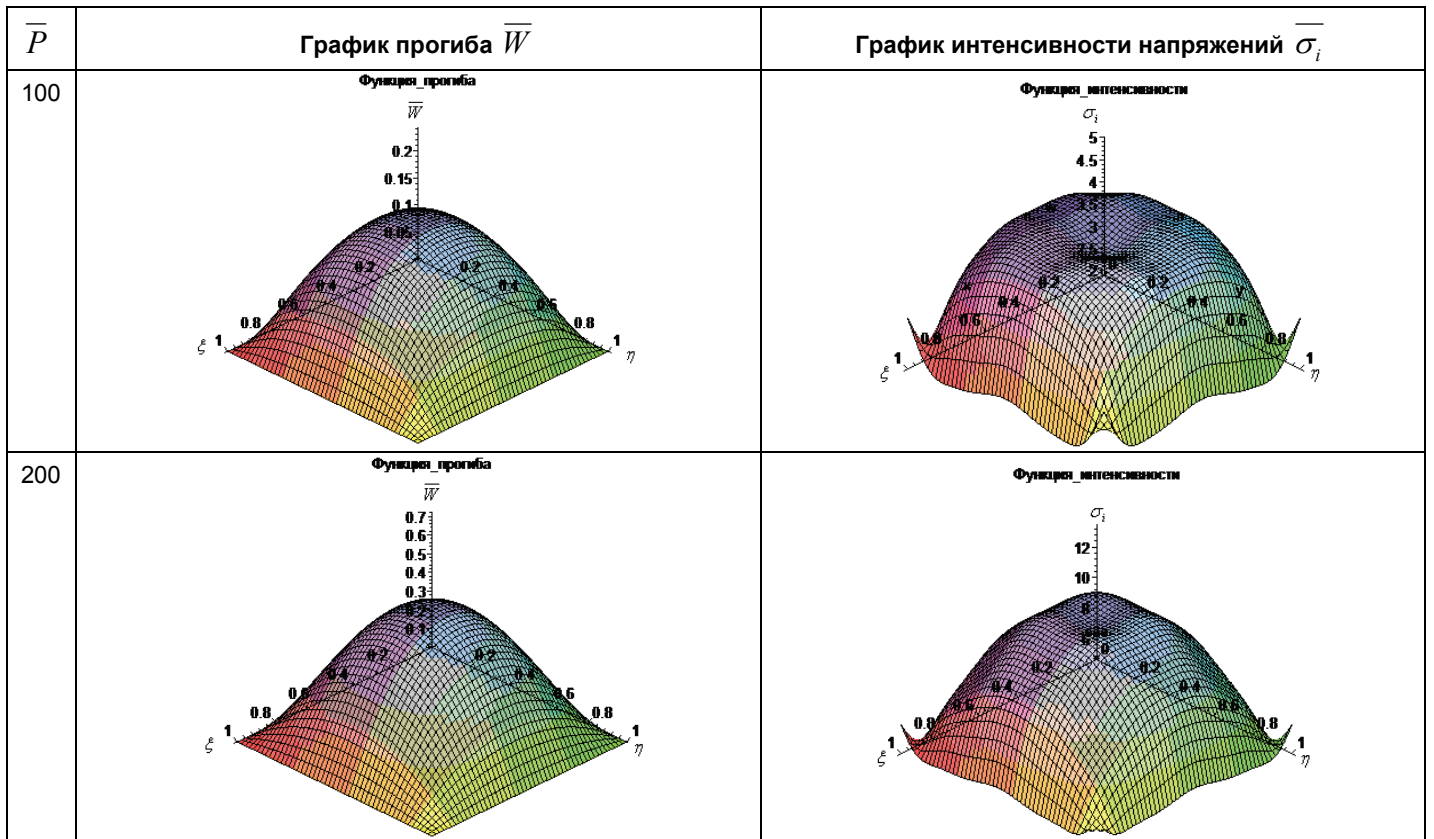


Рисунок 5. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки ($N_p = 0$) варианта I

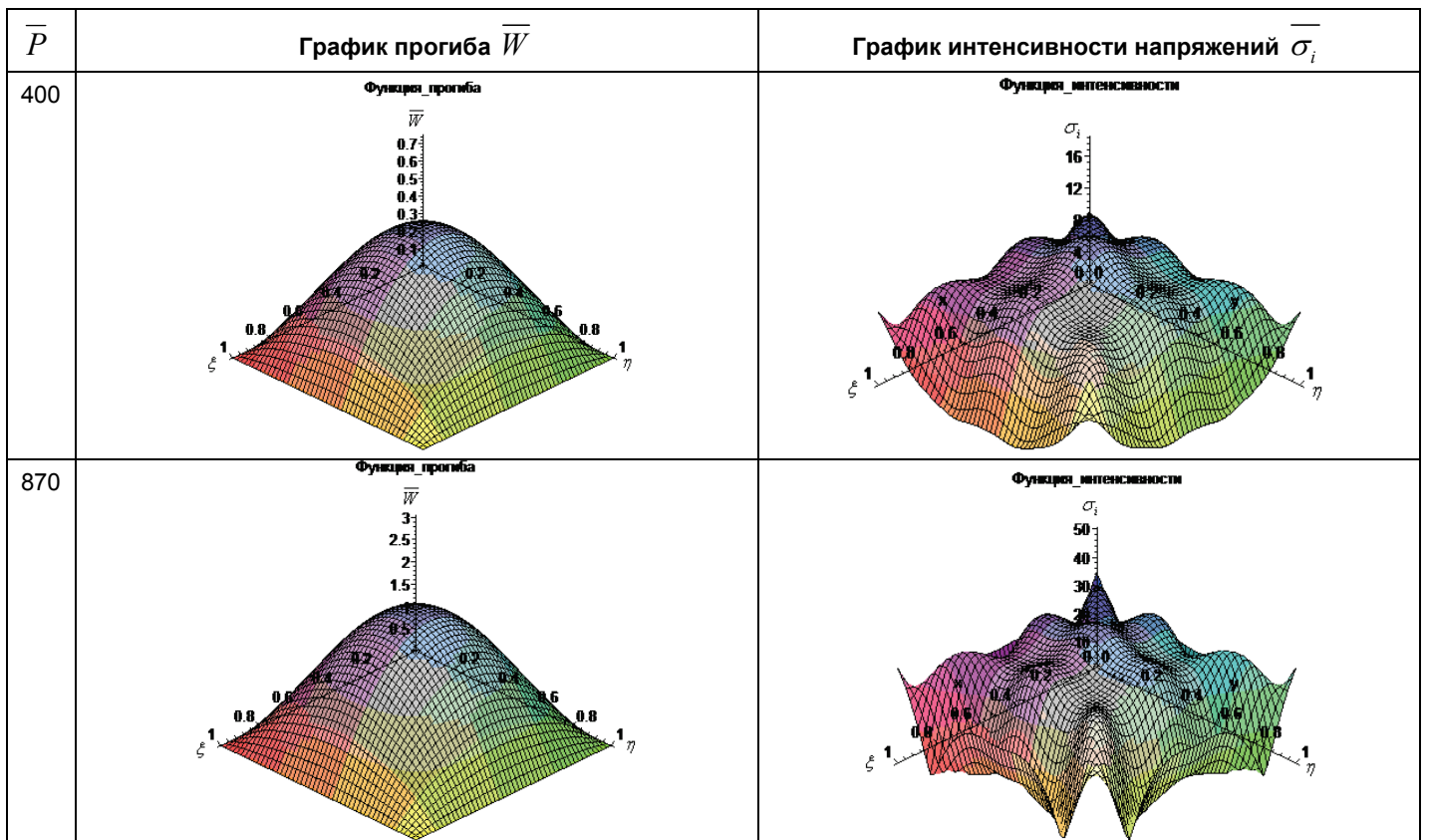


Рисунок 6. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки варианта I с шестью ($N_p = 6$) ребрами подкрепления

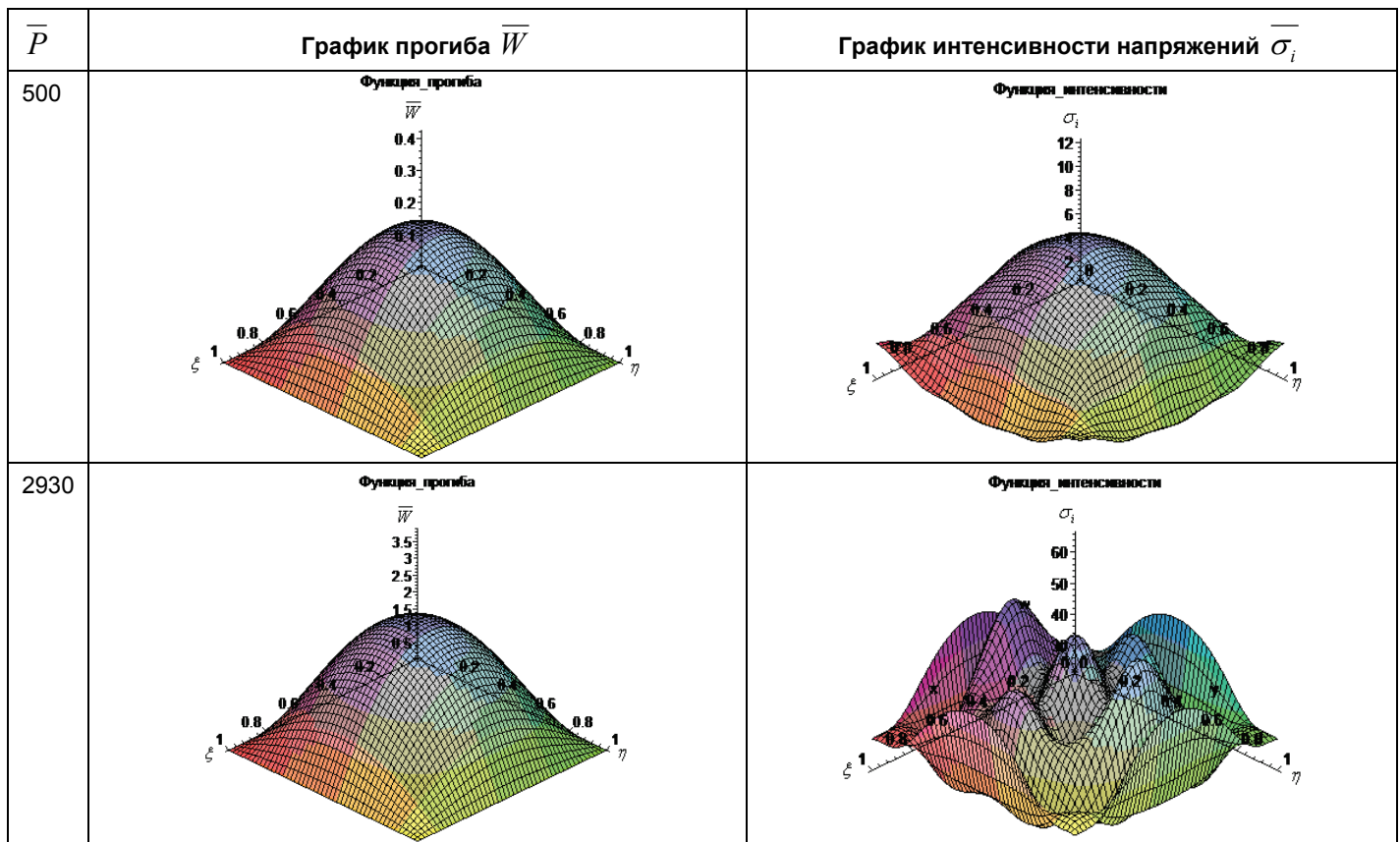


Рисунок 7. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки варианта I с восемнадцатью ($N_p = 18$) ребрами подкрепления

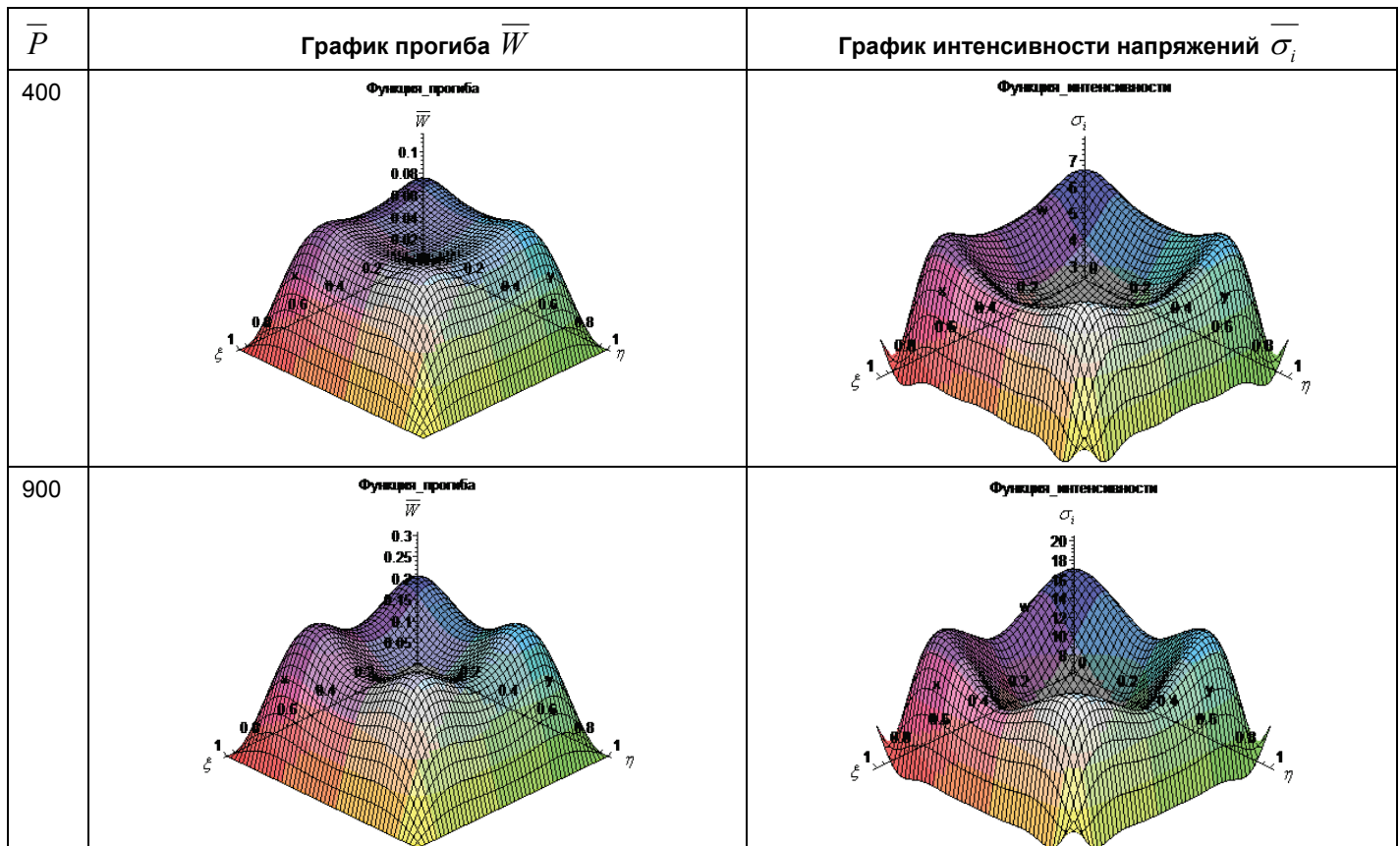


Рисунок 8. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки ($N_p = 0$) варианта II

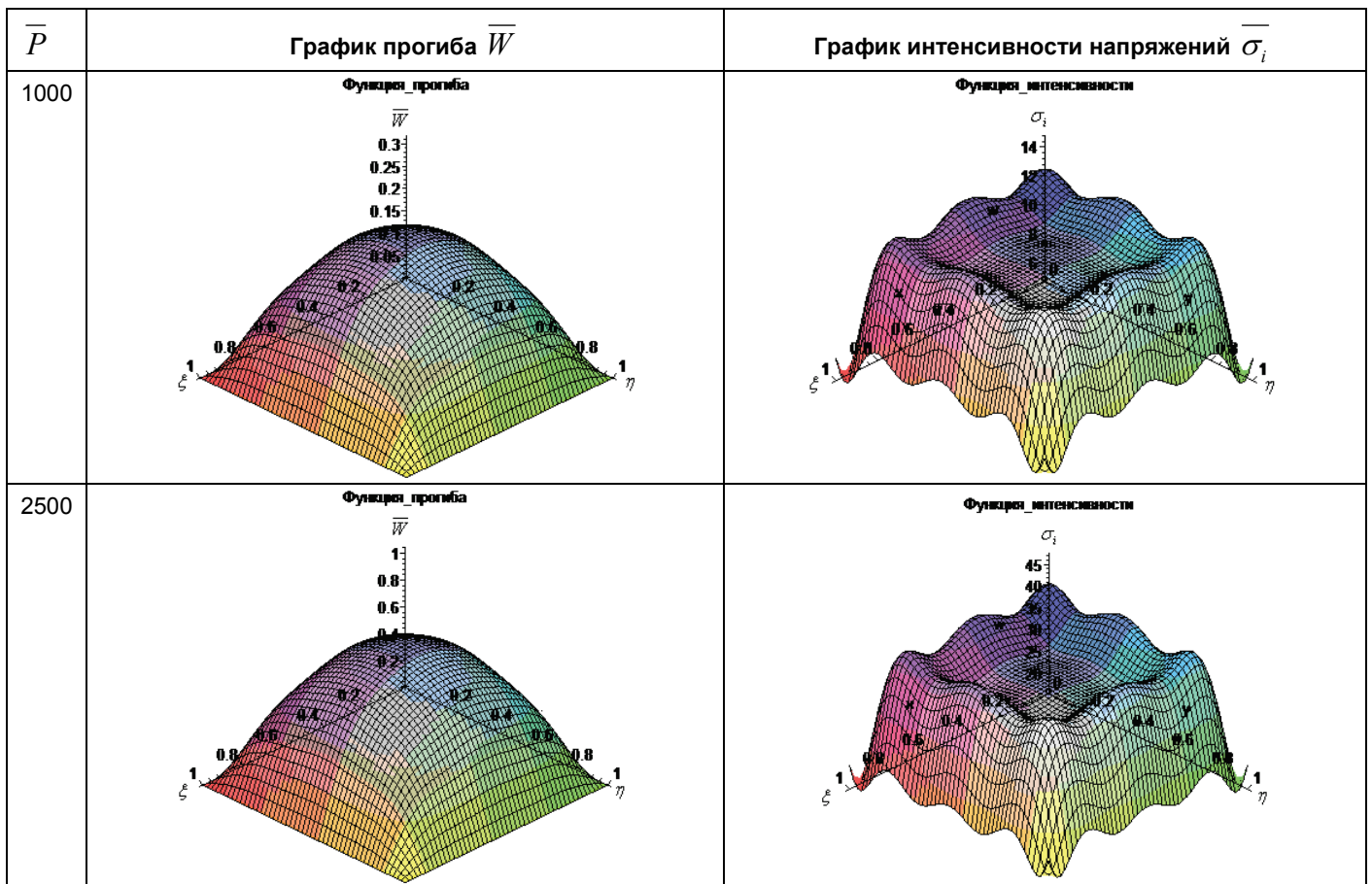


Рисунок 9. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки варианта II с шестью ($N_p = 6$) ребрами подкрепления

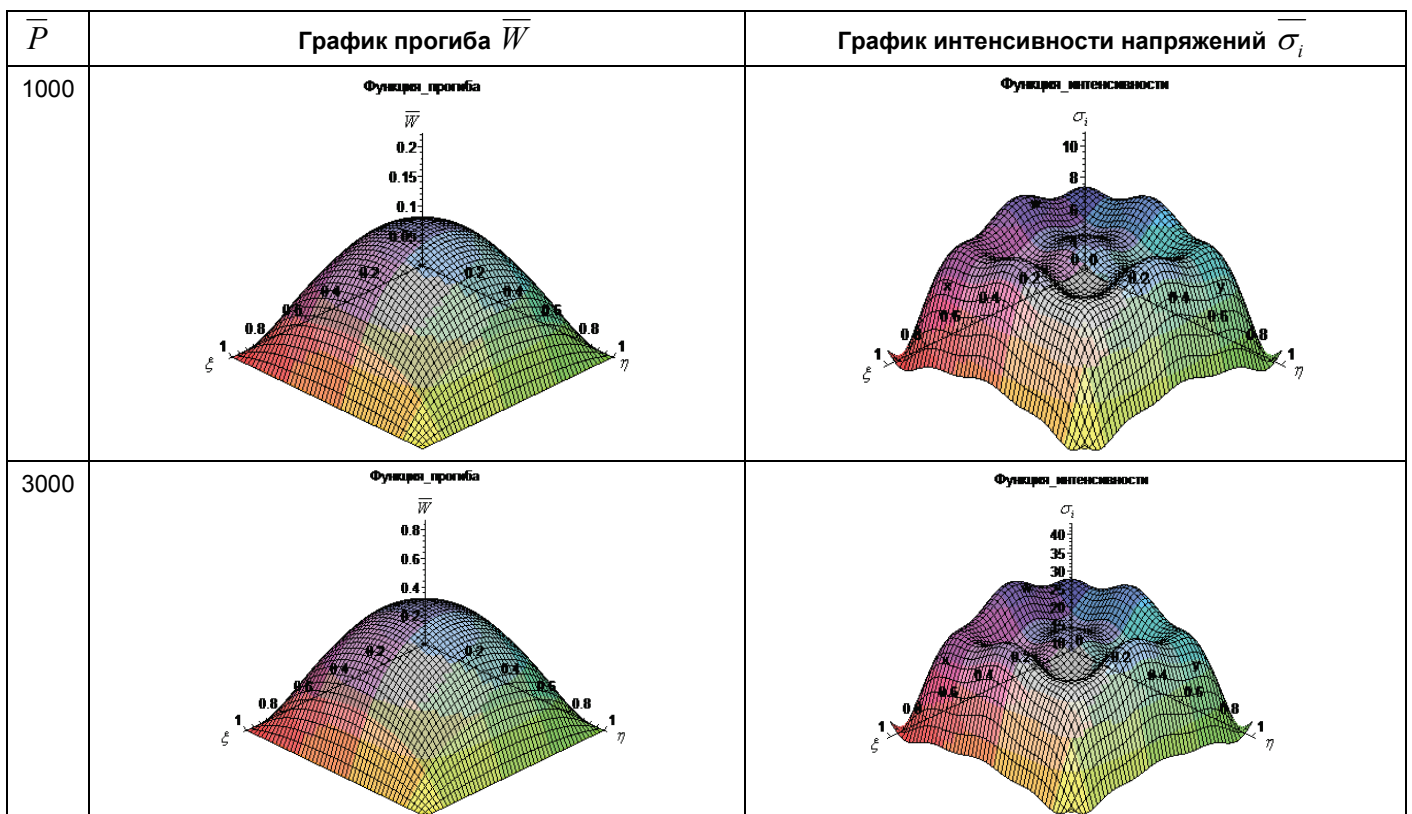


Рисунок 10. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки варианта II с восемнадцатью ($N_p = 18$) ребрами подкрепления

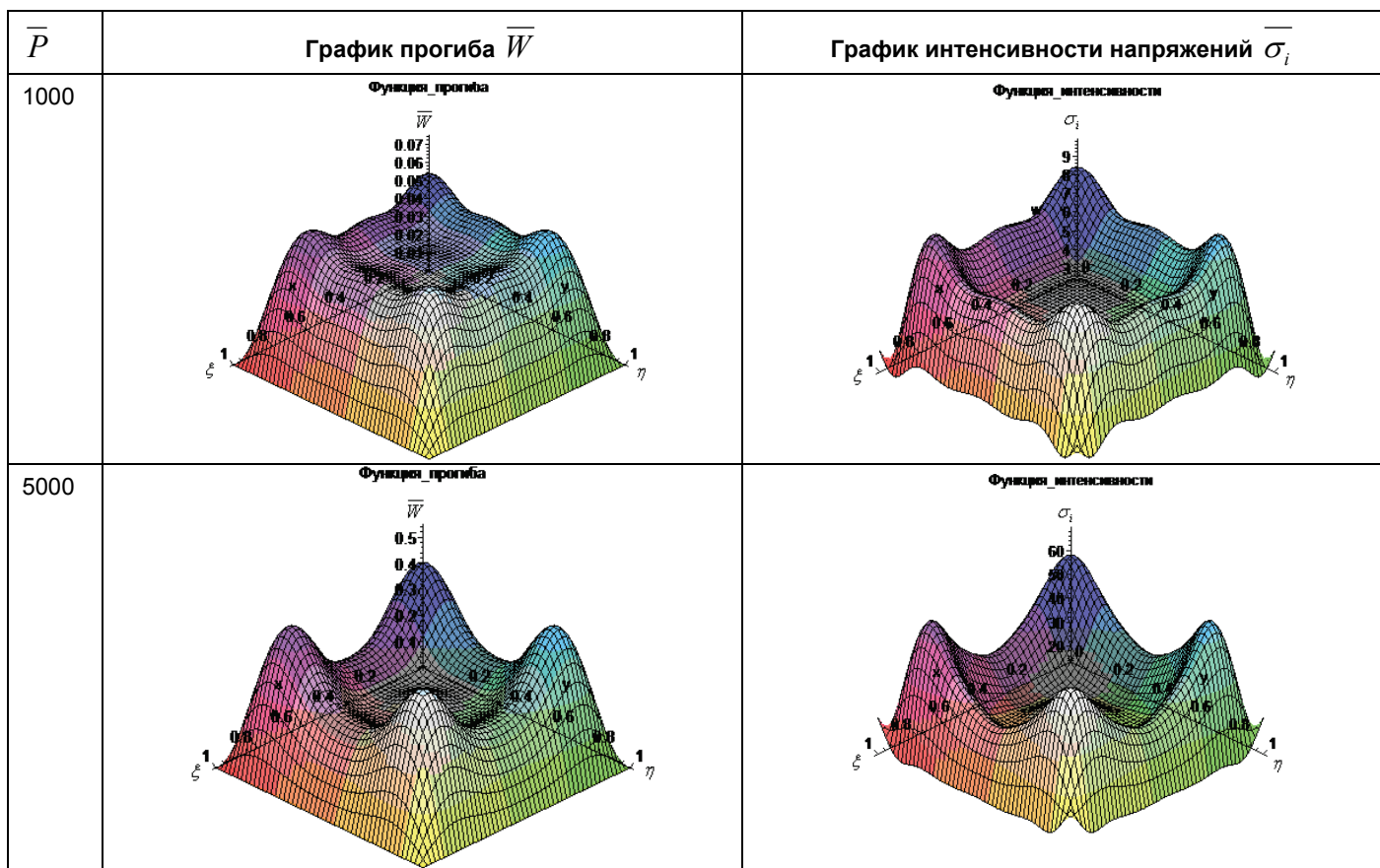


Рисунок 11. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки ($N_p = 0$) варианта III

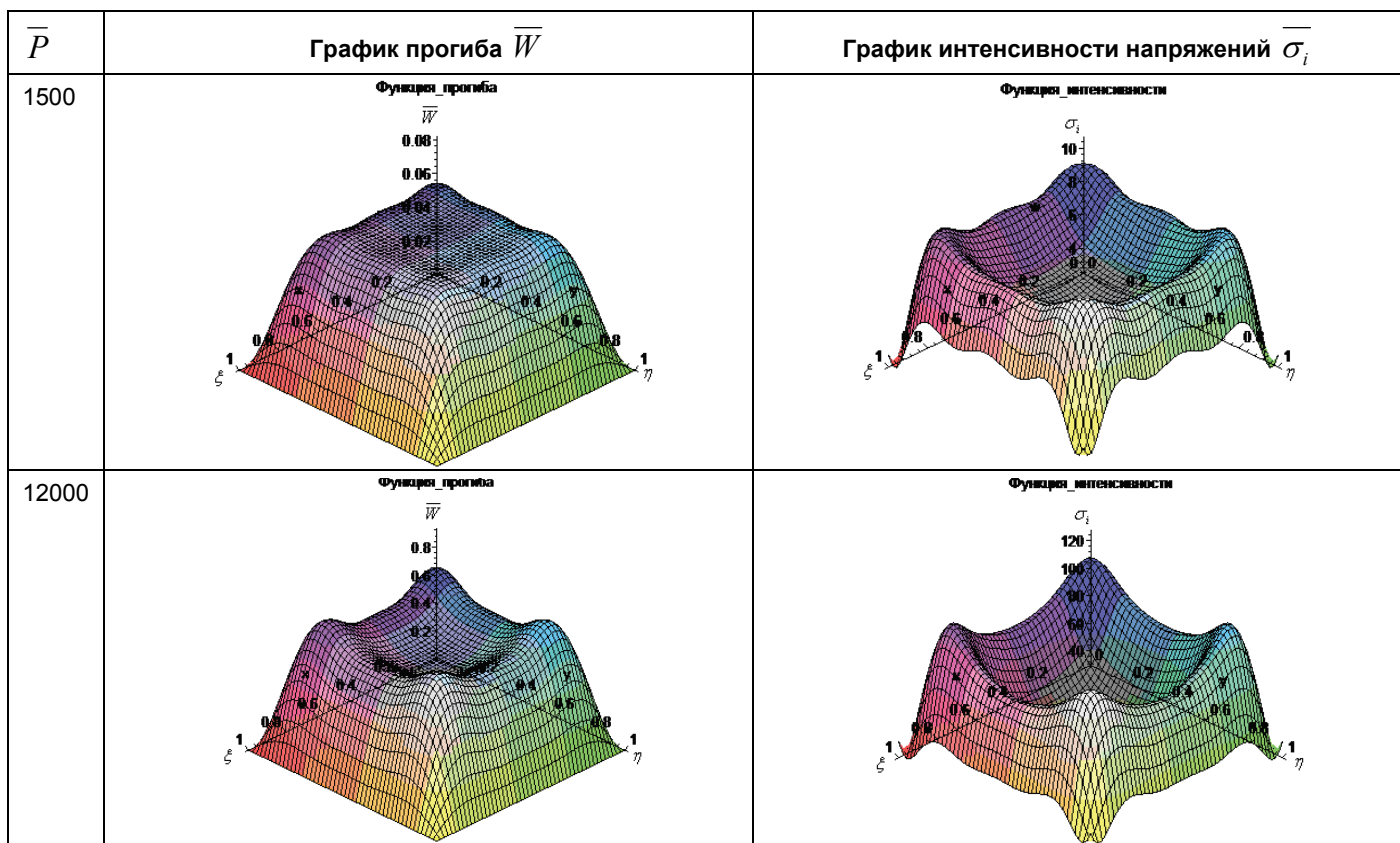


Рисунок 12. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки варианта III с шестью ($N_p = 6$) ребрами подкрепления

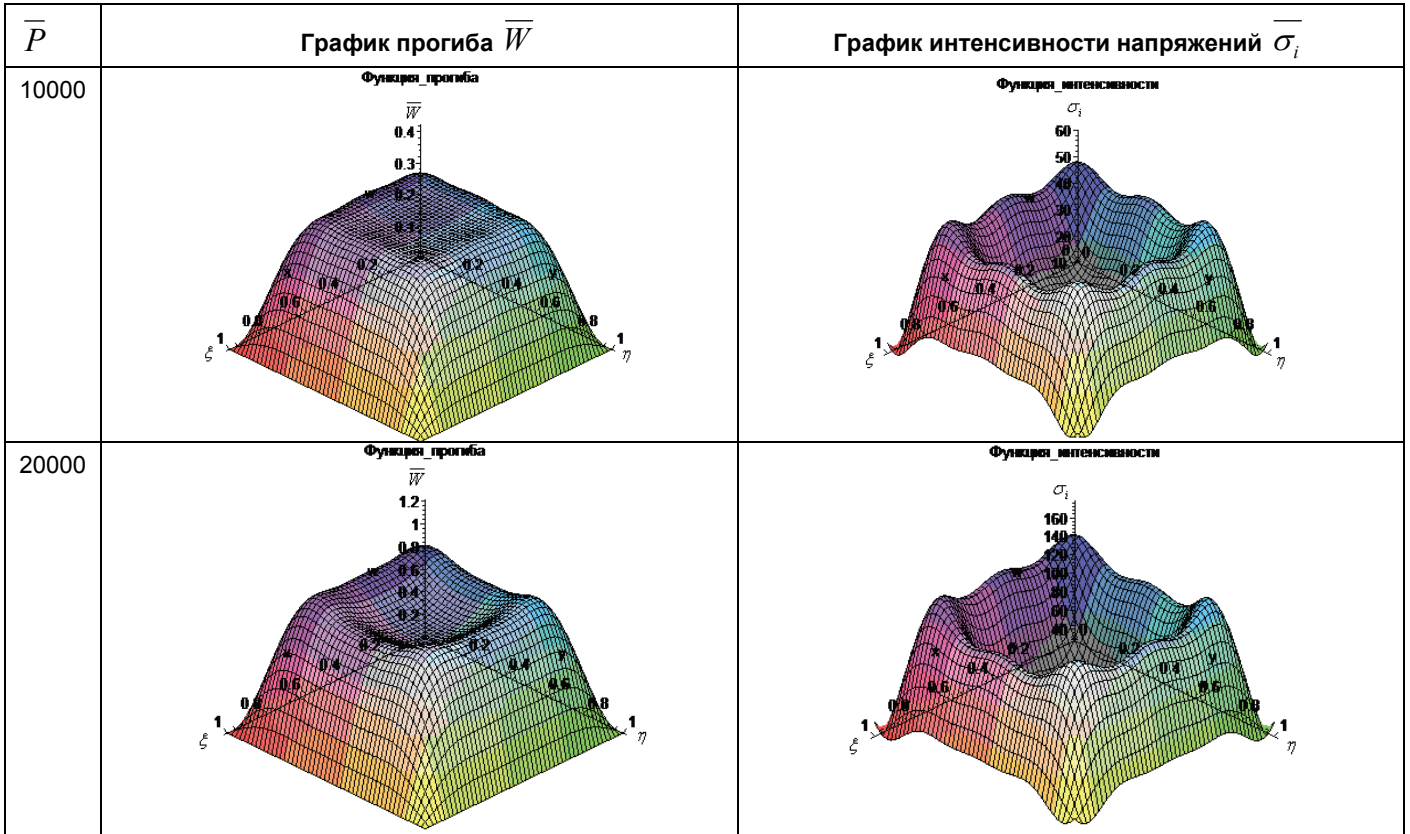


Рисунок 13. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки варианта III с восемнадцатью ($N_p = 18$) ребрами подкрепления

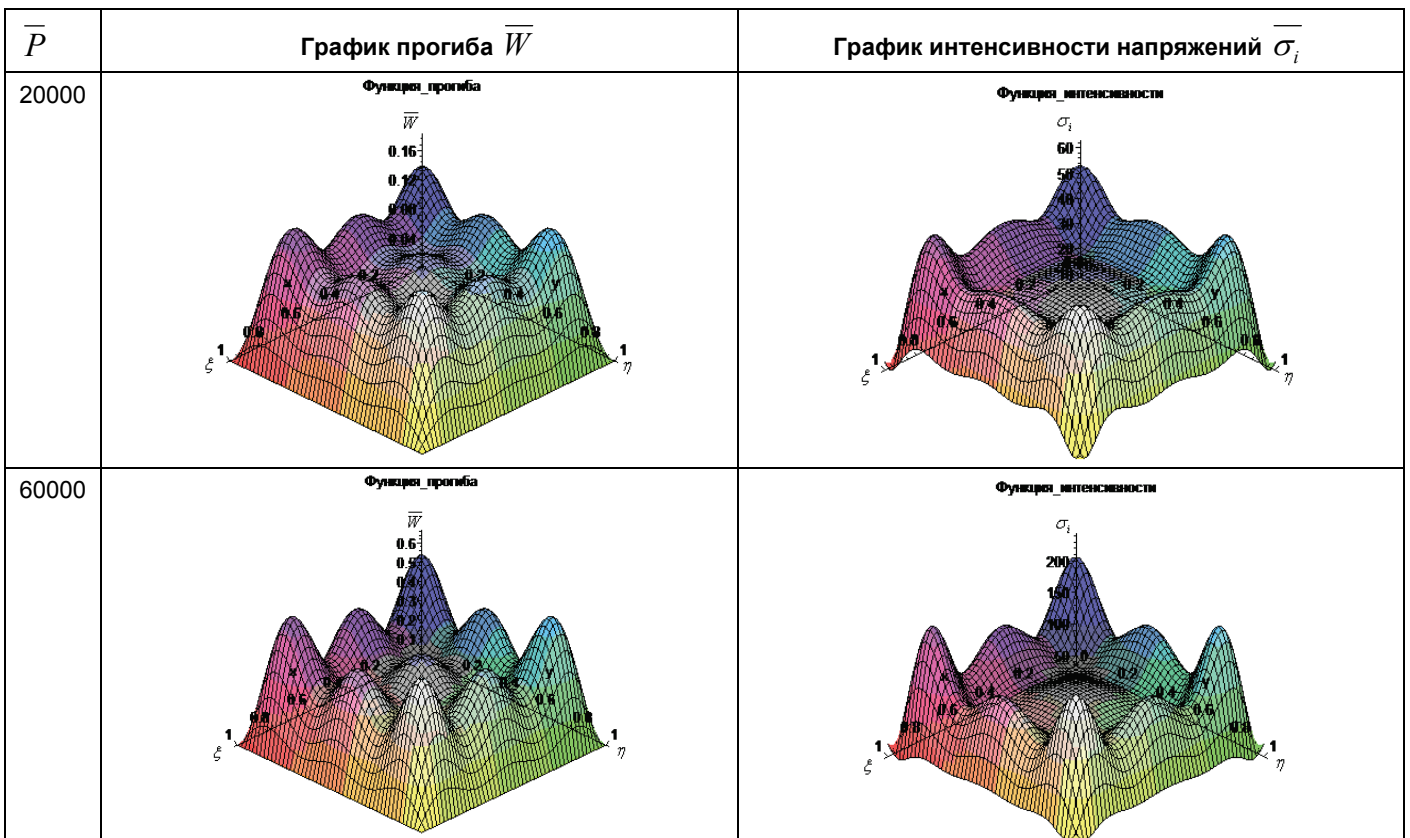


Рисунок 14. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для гладкой оболочки ($N_p = 0$) варианта IV

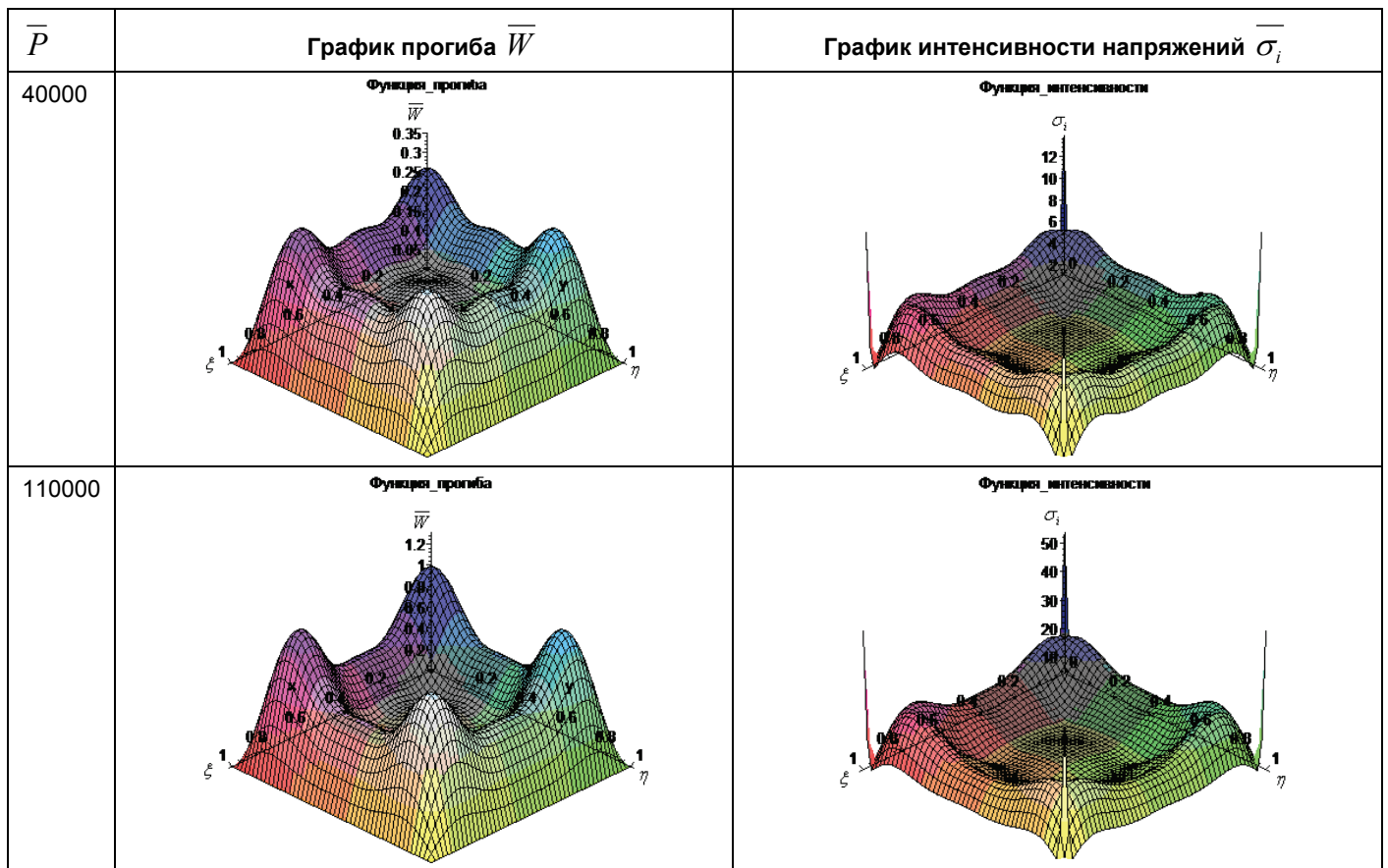


Рисунок 15. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки варианта IV с шестью ($N_p = 6$) ребрами подкрепления

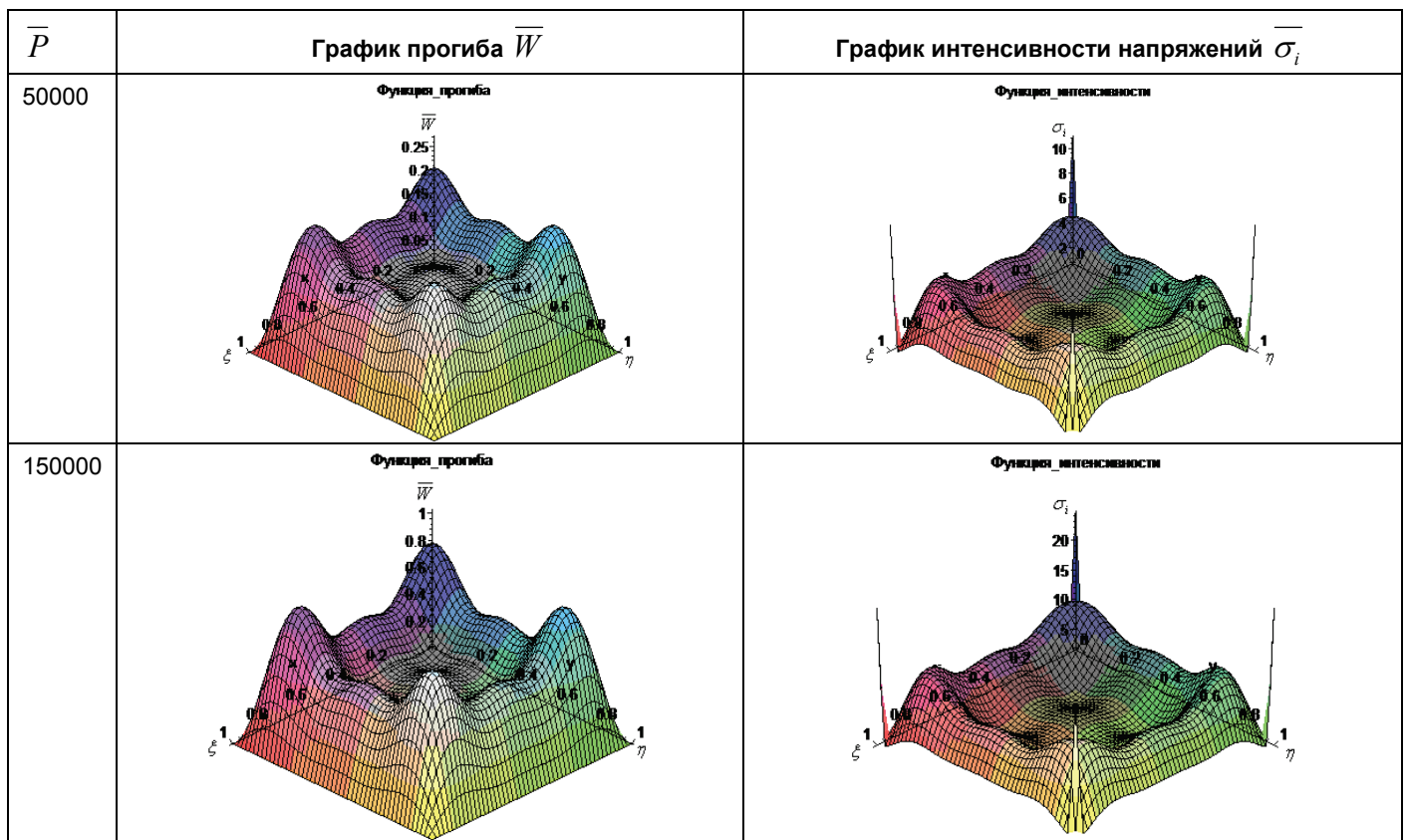


Рисунок 16. Графики изменения прогиба \bar{W} и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_i$ для ребристой оболочки варианта IV с восемнадцатью ($N_p = 18$) ребрами подкрепления

В случае гладких оболочек (рис. 5, 8, 11 и 14) наибольший уровень интенсивности напряжений (при нагрузках, близких к $\bar{P}_{кр}$) составляет: $\bar{\sigma}_i^{max}=9$ (для оболочек варианта I), $\bar{\sigma}_i^{max}=24$ (для оболочек варианта II), $\bar{\sigma}_i^{max}=80$ (для оболочек варианта III), $\bar{\sigma}_i^{max}=370$ (для оболочек варианта IV).

В случае ребристых оболочек с шестью ребрами подкрепления (рис. 9, 12 и 15) мы имеем: $\bar{\sigma}_i^{max}=48$ (для оболочек варианта II), $\bar{\sigma}_i^{max}=140$ (для оболочек варианта III), $\bar{\sigma}_i^{max}=510$ (для оболочек варианта IV).

В случае ребристых оболочек с восемнадцатью ребрами (рис. 10, 13 и 16): $\bar{\sigma}_i^{max}=54$ (для оболочек варианта II), $\bar{\sigma}_i^{max}=200$ (для оболочек варианта III) и $\bar{\sigma}_i^{max}=630$ (для оболочек варианта IV).

Мы видим также, что в сравнении с гладкими оболочками значения критических безразмерных нагрузок $\bar{P}_{кр}$ для ребристых оболочек соответствующего варианта возрастают более чем в два раза при шести ребрах подкрепления и более чем в три раза при восемнадцати ребрах. Эта примерное соотношение сохраняется и для размерных критических нагрузок.

Подчеркнем, что участки оболочки, расположенные вблизи угловых точек и вдоль контура закрепления, являются наиболее опасными, поскольку в точках именно этих участков напряжения достигают наибольшего уровня. Это обстоятельство является нежелательным и способствует в полимерных оболочках развитию деформаций ползучести при длительных нагрузках.

6. Контроль прочности полимерных оболочечных конструкций

При исследовании устойчивости оболочек, изготовленных из оргстекла, для проверки их прочности применяем критерий Мизеса-Генки-Хубера [2–7].

Наибольшие размерные значения интенсивности напряжений в случаях различных оболочек, изготовленных из оргстекла, представлены в табл. 4 (для гладких оболочек вариантов I–IV) и табл. 5 (для ребристых оболочек вариантов II–IV с восемнадцатью ребрами подкрепления).

Таблица 4. Наибольшие размерные значения интенсивности напряжений σ_i^{max} для гладких оболочек

Материал оболочки	σ_T , МПа	σ_i^{max} , МПа, для вариантов оболочек			
		I	II	III	IV
Оргстекло	75	8,25	7,92	6,60	3,39

Таблица 5. Наибольшие размерные значения интенсивности напряжений σ_i^{max} для ребристых оболочек с восемнадцатью ребрами

Материал оболочки	σ_T , МПа	σ_i^{max} , МПа, для вариантов оболочек		
		II	III	IV
Оргстекло	75	17,82	16,5	5,78

Предположим, что коэффициент запаса прочности k равен 2.

Тогда, исходя из данных табл. 4 и 5, следует вывод, что гладкие и ребристые полимерные оболочки всех рассмотренных вариантов не теряют прочности при потере устойчивости.

Рассматривая гладкие и ребристые оболочки при одинаковых нагрузках, приходим к выводу, что ребристые оболочки обладают большим запасом прочности (являются более прочными) в сравнении с гладкими оболочками. При этом материалоемкость ребристых оболочек, естественно, будет меньшей.

В целом результаты исследования показывают следующее.

При подкреплении оболочек ребрами жесткости размерные критические нагрузки возрастают в несколько раз. При этом характер распределения прогибов и напряжений (интенсивностей напряжений) по полю оболочки становится более равномерным.

Вблизи критических нагрузок напряжения, возникающие в материале полимерной оболочки, достигают достаточно высокого уровня, в частности, в местах прикрепления ребер и вблизи контура закрепления. Это обстоятельство может способствовать деформации ползучести (при длительных нагрузках), а также привести к потере прочности.

Жгутов В.М. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. III

Все это говорит о том, что при проектировании оболочечных полимерных конструкций необходимо проводить расчеты не только в упругой постановке, но и с учетом возможных деформаций ползучести в оболочках, выполненных из оргстекла.

Литература

1. Жгутов В.М. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. I // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 7. – С.55–64.
2. Жгутов В.М. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. II // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №8. – С. 31–39.
3. Жгутов В.М. Математические модели и алгоритмы исследования устойчивости пологих ребристых оболочек при учете различных свойств материала // Изв. Орловского гос. техн. ун-та. Сер. «Строительство, транспорт». – 2007.– № 4. – С. 20–23.
4. Жгутов В.М., Мухин Д.Е., Панин А.Н. Прочность и устойчивость ребристых пологих оболочек с учетом геометрической и физической нелинейности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 2. – С. 41–44.
5. Жгутов В.М. Исследование прочности и устойчивости ребристых оболочек с помощью вычислительного эксперимента // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Сборник докладов VII Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте 23-24 апреля 2008 года. – СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2008. – 267 с. – С. 110-131.
6. Жгутов В.М. Математическая модель и алгоритм исследования прочности и устойчивости ребристых оболочек с учетом различных свойств материала // Инженерные системы – 2008: Всероссийская научно-практическая конференция: Труды конференции. Москва, 7-11 апреля 2008 года, РУДН. – М. : Изд-во РУДН, 2008. – 380 с. – С. 341-346.
7. Жгутов В.М. Компьютерное моделирование прочности и устойчивости упругих ребристых оболочек // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Международная конференция (RELMAS'2008): Труды международной конференции. С.-Петербург, 17–20 июля 2008 года, СПбГПУ. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 419 с. – С. 122-128.
8. Жгутов В.М. Устойчивость ребристых пологих оболочек при учете геометрической и физической нелинейностей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 4. – С. 65-70.
9. Жгутов В.М. Математическая модель, алгоритм исследования и анализ устойчивости нелинейно-упругих ребристых оболочек при больших перемещениях // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер. «Физико-математические науки» – 2009. – № 4. – С. 24–30.
10. Жгутов В.М. Анализ различных подходов к исследованию ползучести в материале ребристых пологих оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – № 1. – С. 4–12.
11. Жгутов В.М. Математические модели, алгоритм исследования и анализ устойчивости ребристых оболочек с учетом ползучести материала при конечных прогибах // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер. «Физико-математические науки» – 2010. – № 2. – С. 53–59.
12. Жгутов В.М. Нелинейные свободные колебания пологих оболочек ступенчато-переменной толщины: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.17: Санкт–Петербург, 2004. – 177 с.
13. Нелинейные математические модели деформирования оболочек переменной толщины и алгоритмы их исследования: Учебное пособие / Карпов В.В., Игнатъев О.В., Сальников А.Ю. – М. : АСВ; СПб: СПбГАСУ, 2002. – 420 с.
14. Власов В.З. Избранные труды. – В 3-х т.– Т.1. – М. : Изд-во АН СССР. – 1962. – 528 с.
15. Петров В.В., Иноземцев В.К., Синева Н.Ф. Теория наведенной неоднородности и ее приложения к проблеме устойчивости пластин и оболочек. – Саратов, Саратов. гос. техн. ун-т, 1996. – 312 с.
16. Климанов В.И., Тимашев С.А. Нелинейные задачи подкрепленных оболочек. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – 291 с.
17. Reissner E. On a variational theorem in elasticity // J. Math. and Phys. – 1950. – № 2.

**Владимир Михайлович Жгутов, Санкт-Петербург
Тел. раб.: +7(812)378-20-83; эл. почта: abc_kitezh@mail.ru*