

## Влияние способа закрепления стеклопакетов на прочность стекол

К.т.н. А.Г. Чесноков (ОАО "Институт Стекла"), С.А. Чесноков, Б.И. Краснопольский  
(МИФИ), Москва

Традиционно в строительстве применялись стекла сравнительно небольших размеров (за исключением, пожалуй, витрин магазинов), которые крепились по четырем сторонам. Развитие архитектуры, доступность и улучшение качества стекла стали причиной увеличения размеров применяемого остекления [1]. Желание разнообразить архитектурный облик зданий также является причиной того, что стали применяться различные способы крепления стекол: по двум, трем, четырем сторонам, с помощью различного количества спайдеров. При этом очень часто не задумываются над тем, что разные способы закрепления стекол приводят к разным напряжениям и прогибам в них при эксплуатации. Недооценка роли способа крепления в обеспечении устойчивости конструкций может вызвать их разрушение. При проектировании рост напряжений и прогибов приходится компенсировать увеличением толщины стекол или уменьшением их размеров (на что архитекторы обычно не соглашаются). Увеличение толщины стекол, в свою очередь, приводит к увеличению нагрузки на строительные конструкции и росту цены остекления, что вызывает негативную реакцию заказчиков. Поэтому вопросы размеров стекол и способов их закрепления должны обсуждаться на начальном этапе проектирования остекления, а лучше – на начальном этапе проектирования здания, чтобы строительные конструкции гарантировано выдержали нагрузки от остекления.

Для понимания сути вопросов, сильно упрощая теоретические выкладки, приведенные в [2], следует отметить, что напряжение в стеклянной пластине можно приближенно считать прямо пропорциональным расчетной нагрузке и квадрату линейного размера пластины. Также оно обратно пропорционально квадрату толщины стекла. Прогиб же стекла пропорционален четвертой степени линейного размера пластины и обратно пропорционален кубу толщины стекла. Коэффициенты пропорциональности при этом зависят от способа крепления и соотношения сторон пластины. Под линейным размером понимается длина незакрепленной стороны, если мы говорим о прямоугольном стекле. В случае закрепления по всем сторонам всегда имеется в виду длина меньшей стороны. Приняв во внимание хотя бы эти соображения, мы можем сделать первый вывод: стекла,

не имеющие незакрепленных или неопертых сторон, подвержены гораздо меньшим напряжениям и прогибаются гораздо меньше. Также очень важно, из тех же соображений, чтобы длины незакрепленных сторон были наименьшими, если полное опирание невозможно. Таким образом, различные способы крепления стекла неравноценны с точки зрения устойчивости конструкции. Проиллюстрируем это на примере остекления с использованием стеклопакета размером 3 x 2 метра (этот размер лежит в самом популярном на сегодня диапазоне: перекрывает всю высоту этажа и всю ширину окна). Для расчета мы выбрали пакет с дистанционной рамкой шириной 16 мм (самая удобная рамка с точки зрения теплотехники). Точечные крепления размещались в 100 мм от краев пакета.

Рассмотрим структуру расчетной нагрузки. Главными компонентами нагрузки являются:

- Постоянные нагрузки – собственный вес, например, но в нашем примере стеклопакет расположен вертикально, поэтому вес стеклопакета начинает влиять на прочность стекол только при неправильном (невертикальном) его монтаже и сильных прогибах стекол, что повышает требования к качеству монтажа остекления;
- Высотные нагрузки, которые связаны с изменением атмосферного давления и характерной силы ветра с ростом высоты над уровнем основания;
- Снеговые нагрузки, которые тоже существенны только для горизонтального и наклонного остекления;
- Климатические нагрузки, возникающие из-за того, что условия эксплуатации стеклопакета (температура и давление) отличаются от условий при производстве, в России играют существенно большее значение, чем в странах Западной Европы и часто являются доминирующими;
- Ветровые нагрузки или другие кратковременные нагрузки.

Для примера мы рассмотрим остекление, расположенное вертикально на высоте не более 80 метров (20 – 25 этажное здание, каких сейчас много строят) от поверхности земли, в Московском регионе. Расчетная ветровая нагрузка при этом составит (согласно СНиП [3] «Нагрузки и воздействия»)  $0,400 \text{ кН/м}^2$ . Диапазоны колебаний наружной температуры и атмосферного давления приняты по СНиП [4]. Каких-либо дополнительных эксплуатационных нагрузок не предусмотрено. Расчет производится по схеме, основан-

ной на prEN 13474 [5, 6]. Данная схема отличается тем, что в ней происходит поэтапная проверка различных сочетаний нагрузок для выбора их наиболее опасной комбинации и вводятся различные коэффициенты запаса. В таблицах 1,2 приведены значения прогиба и напряжения для наиболее неблагоприятного сочетания всех возможных нагрузок для разных способов закрепления стеклопакета и толщины стекол, обеспечивающие выполнение всех требований. Таблицы начинаются со стеклопакета со стеклами толщиной по 6 мм, поскольку их обычно пытаются применить в этом случае из-за того, что у большинства производителей стекол с покрытиями максимальная толщина стекол с низкоэмиссионными или солнцезащитными покрытиями как раз 6 мм, стекла с покрытиями большей толщины выпускаются только на заказ. Для сравнения приведен также вес стеклопакета. В случае если стеклопакет не выдерживает какой-либо другой этап проверки, это отмечено отдельно.

В соответствии с ГОСТ 111 [7] справочное значение напряжения на изгиб для листового стекла составляет 15 МПа, что при данной конструкции стеклопакета и размерах стекол соответствует допустимому напряжению в стекле, в случае использования флоат-стекла,  $30,7 \text{ Н/мм}^2$ . Аналогично, в случае использования закаленного стекла по ГОСТ 30698 [8] – 120 МПа, что соответствует –  $80,7 \text{ Н/мм}^2$ . Допустимый прогиб стекол в соответствии с BS 6180 [9] (не более  $1/250$  узкой стороны) равен 8 мм. Следует отметить, что проектировщики часто пренебрегают ограничениями на величины прогибов, считая их несущественными из-за отсутствия в отечественных нормативных документах. На самом деле, это чрезвычайно важное ограничение по нескольким причинам: выполняемые прочностные расчеты основаны на предположении, что лист стекла находится в условиях упругой деформации, а при больших прогибах стекло переходит в зону хрупкого разрушения, где прочность стекла существенно падает и разрушение происходит лавинообразно; при прогибах листа стекла, он отклоняется от вертикали и появляется дополнительная нагрузка от собственного веса стекла, увеличивающая напряжение в стекле, что, обычно, не учитывается при расчетах вертикального остекления; при больших прогибах стекол в стеклопакетах возможно их разрушение из-за удара друг об друга и так далее.

Для исследования точечных креплений мы использовали программы моделирования, разработанные авторами [2]. Следует отметить, что наша модель позволяет полу-

читать не только значение максимального прогиба и напряжения, но и распределение этих величин. Однако, получаемые с ее помощью значения, как можно заметить, не совсем корректно сравнивать с расчетами по  $r_gEN$ , так как последние неявно содержат некоторый запас (учитывающий, в частности, разброс прочности материалов конструкции) и предполагают, что каждое из стекол пакета находится в наихудших для него условиях. Наша модель более «физична», но вычисления по ней чрезвычайно ресурсоемки. Кроме того, погрешность расчета напряжения довольно велика, что связано с математическими особенностями решаемой задачи. Поэтому мы приводим только величины прогибов. На приводимых иллюстрациях можно видеть, что наибольший прогиб внешнего стекла достигается в геометрическом центре, а внутреннего – в краевых зонах для 4-точечного крепления. Размещение в этих зонах еще двух узлов крепления существенно улучшает ситуацию – прогибы уменьшаются в 2-3 раза. Наибольшие напряжения при точечном креплении наблюдаются вблизи узлов крепления и на максимальном удалении от них – в середине стекла.

Расчеты показывают, что для устойчивости остекления имеет значение, как выбор способа закрепления, так и порядка расположения стекол в стеклопакете. При проектировании полезно помнить, что стоит рассмотреть вариант стеклопакета из стекол разной толщины. Оказывается также, что для остекления большой площади закрепление по двум сторонам или при помощи 4 точек часто нецелесообразно – ведь для обеспечения надежности требуется слишком тяжелая и дорогостоящая конструкция. Поэтому, мы рекомендуем увеличивать число точек крепления до 6-8, если площадь элемента превышает  $3-4 \text{ м}^2$  и располагать их, разумеется, вдоль длинной стороны или по всем сторонам.

## Литература

1. Чесноков А.Г. "Проблемы фасадного остекления", "Стройпрофиль", № 5 (43), 2005 г., с. 76-77;
2. Краснопольский Б.И., Чесноков А.Г., Чесноков С.А. "Численное моделирование и расчет прочностных свойств стекла", "Стекло и керамика", № 12, 2005 г., с. 14-17;
3. СНиП 2.01.07-85 "Нагрузки и воздействия";
4. СНиП 23-01-99 "Строительная климатология";
5. Проект prEN 13474-1 "Стекло в строительстве - Расчет оконных стекол - Часть 1: Общее обоснование расчета";
6. Проект prEN 13474-2 "Стекло в строительстве - Расчет оконных стекол - Часть 2: Расчет однородно распределенных нагрузок";
7. ГОСТ 111-2001 "Стекло листовое. Технические условия";
8. ГОСТ 30698-2000 "Стекло закаленное строительное. Технические условия";
9. Британские строительные нормы и правила BS 6180:1982 «Защитные преграды внутри и вокруг зданий».

Таблица 1

Сравнительные данные по прочности стеклопакетов, закрепленных по разным сторонам

Мар-ка	Толщи-на внешне-го стек-ла, мм	Толщина внутренне-го стекла, мм	Вес стекло-пакета, кг	Тип опи-ра-ния	Расчетное напряже-ние внеш-него стек-ла, Н/мм <sup>2</sup>	Расчет-ный про-гиб внеш-него стек-ла, мм	Расчетное напряже-ние внут-реннего стекла, Н/мм <sup>2</sup>	Расчетный прогиб внутренне-го стекла, мм	Примечание
C1.1	6	6	180	по 4 сто-ронам	8,84	17,72	8,66	17,36	Не проходит по прогибу.
C1.2	6	8	210	по 4 сто-ронам	5,60	11,23	6,85	10,30	Не проходит по прогибу.
C1.3	8	8	240	по 4 сто-ронам	5,31	7,98	5,08	7,63	
C2.1	6	6	180	по 3 сто-ронам	9,48	21,26	9,29	20,84	Незакреплен-ной считается короткая сто-рона. Не проходит по прогибу.
C2.2	6	8	210	по 3 сто-ронам	6,01	13,48	7,35	12,36	Незакреплен-ной считается короткая сто-рона. Не проходит по прогибу.
C2.3	8	8	240	по 3 сто-	5,69	9,58	5,44	9,16	Незакреплен-

				ронам					ной считается короткая сторона. Не проходит по прогибу.
C2.4	10	8	270	по 3 сторонам	4,82	6,49	3,93	6,61	Незакрепленной считается короткая сторона.
C2.5	8	10	270	по 3 сторонам	4,26	7,17	4,61	6,20	Незакрепленной считается короткая сторона.
C3.1	6	6	180	по 2 сторонам	14,72	29,68	14,43	29,09	Незакрепленной считается короткая сторона. Данный стеклопакет не выдерживает проверку Е.5а. Прогиб также превышает п.д.
C3.2	6	8	210	по 2 сторонам	9,33	18,82	11,41	17,26	Незакрепленной считается короткая сторона.

									Данный стек-лопакет не вы-держивает проверку Е.5а. Прогиб также превышает п.д.
C3.3	8	8	240	по 2 сто-ронам	8,84	13,38	8,45	12,79	Незакреплен-ной считается короткая сто-рона. Не проходит по прогибу.
C3.4	8	10	270	по 2 сто-ронам	6,62	10,02	7,15	8,66	Незакреплен-ной считается короткая сто-рона. Не проходит по прогибу.
C3.5	10	8	270	по 2 сто-ронам	7,48	9,06	6,11	9,24	Незакреплен-ной считается короткая сто-рона. Не проходит по прогибу.
C3.6	10	10	300	по 2 сто-ронам	6,25	7,57	5,77	6,98	Незакреплен-ной считается короткая сто-



									рона.
C3.5.1	10	10	300	по 2 сторонам	14,07	38,31	12,98	35,33	Незакрепленной считается <b>длинная</b> сторона. Данный стеклопакет не выдерживает проверку Е.5а. Прогиб также превышает п.д.
C3.6.1	12	12	360	по 2 сторонам	11,15	25,31	9,84	22,33	Незакрепленной считается <b>длинная</b> сторона. Не проходит по прогибу.
C3.7.1	10.10.10	8.8.8	810	по 2 сторонам	7,05	6,40	6,42	7,29	Незакрепленной считается <b>длинная</b> сторона.

Примечания: 1. Выделены цветом стеклопакеты, отвечающие предъявляемым требованиям.

2. Проверка Е.5а – проверка по п. Е.5.а [6] на неблагоприятное сочетание всех нагрузок, кроме климатической, со специальными коэффициентами надежности

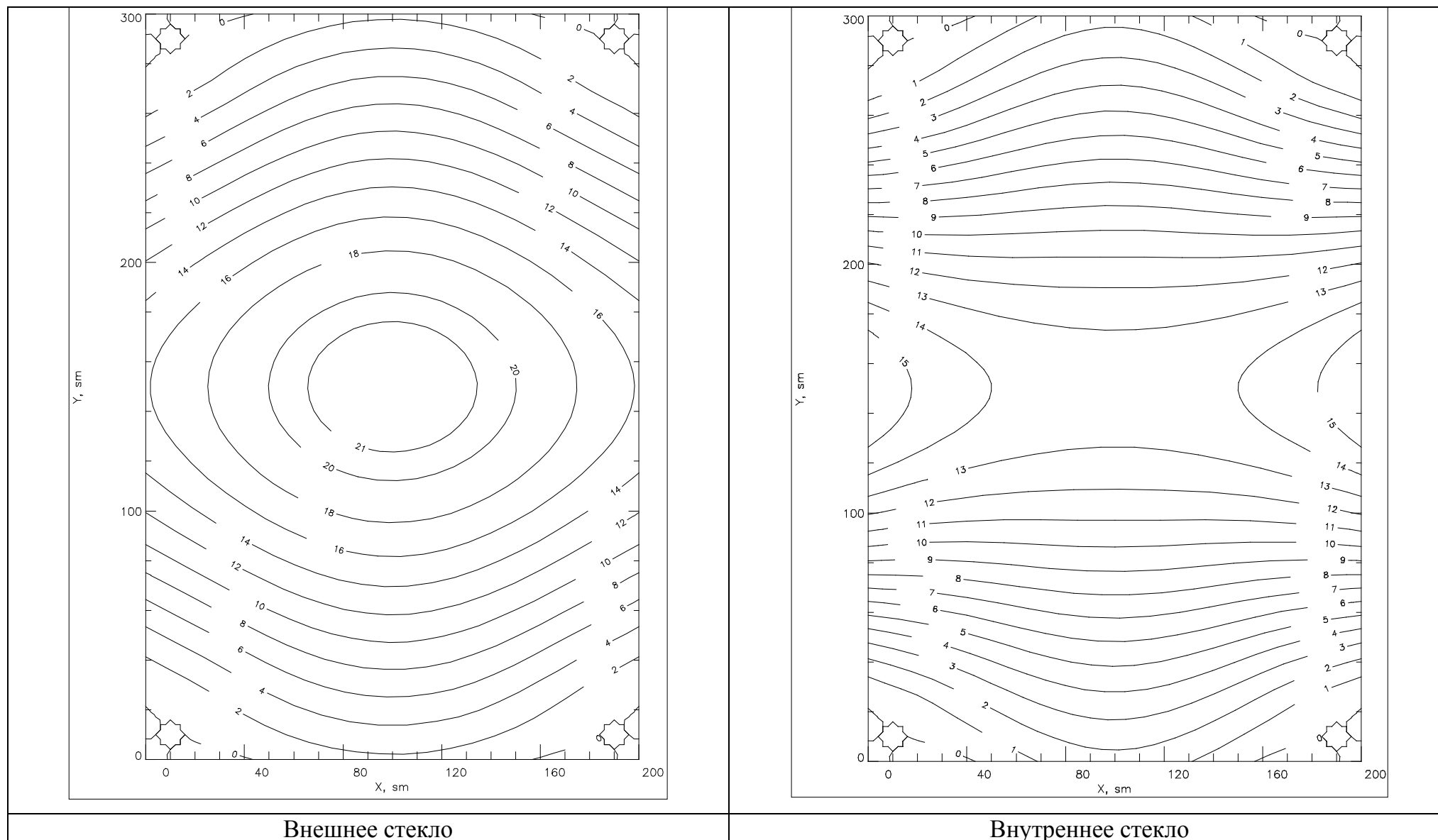
Таблица 2

Результаты расчетов для точечных креплений, указано отклонение от положения равновесия:

Марка	Толщина внешнего стекла, мм	Толщина внутреннего стекла, мм	Вес стеклопакета, кг	Тип крепления	Расчетный прогиб внешнего стекла, мм	Расчетный прогиб внутреннего стекла, мм	Примечание
C4.1	8	8	240	4-точечное	21,96	15,87	Разумеется, такая конструкция не удовлетворяет требованиям
C4.2	10	8	270	4-точечное	14,71	10,61	Можно заметить, что прогибы при помещении более толстого стекла наружу меньше. Однако, при расчете по ргEN ситуация обратная.
C4.3	8	10	270	4-точечное	17,59	10,75	
C4.4	10	10	300	4-точечное	13,17	8,03	Даже такой тяжелый и толстый пакет не удовлетворяет требованиям к прогибу.
C5.1	8	8	240	6-точечное	6,99	2,27	
C5.2	10	8	270	6-точечное	4,72	-3,16	Основной вклад вносит «климатическое» сжатие

C5.3	8	10	270	6-точечное	7,26	1,55	См. примечание к C4.2
C5.4	10	10	300	6-точечное	5,45	-2,37	

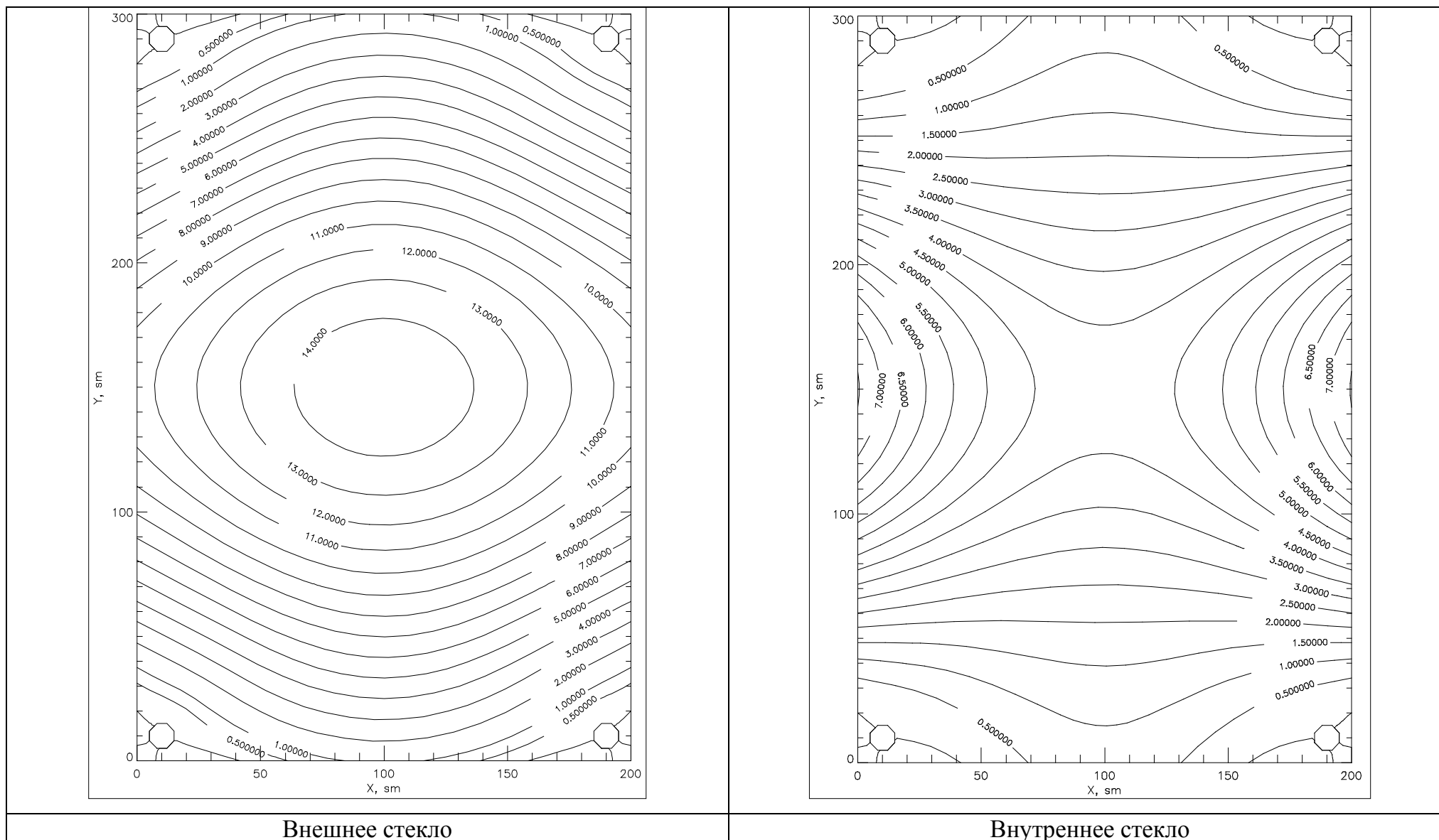
Прогибы внешнего и внутреннего стекла при точечном креплении (марка стеклопакета С4.1 по таблице 2):



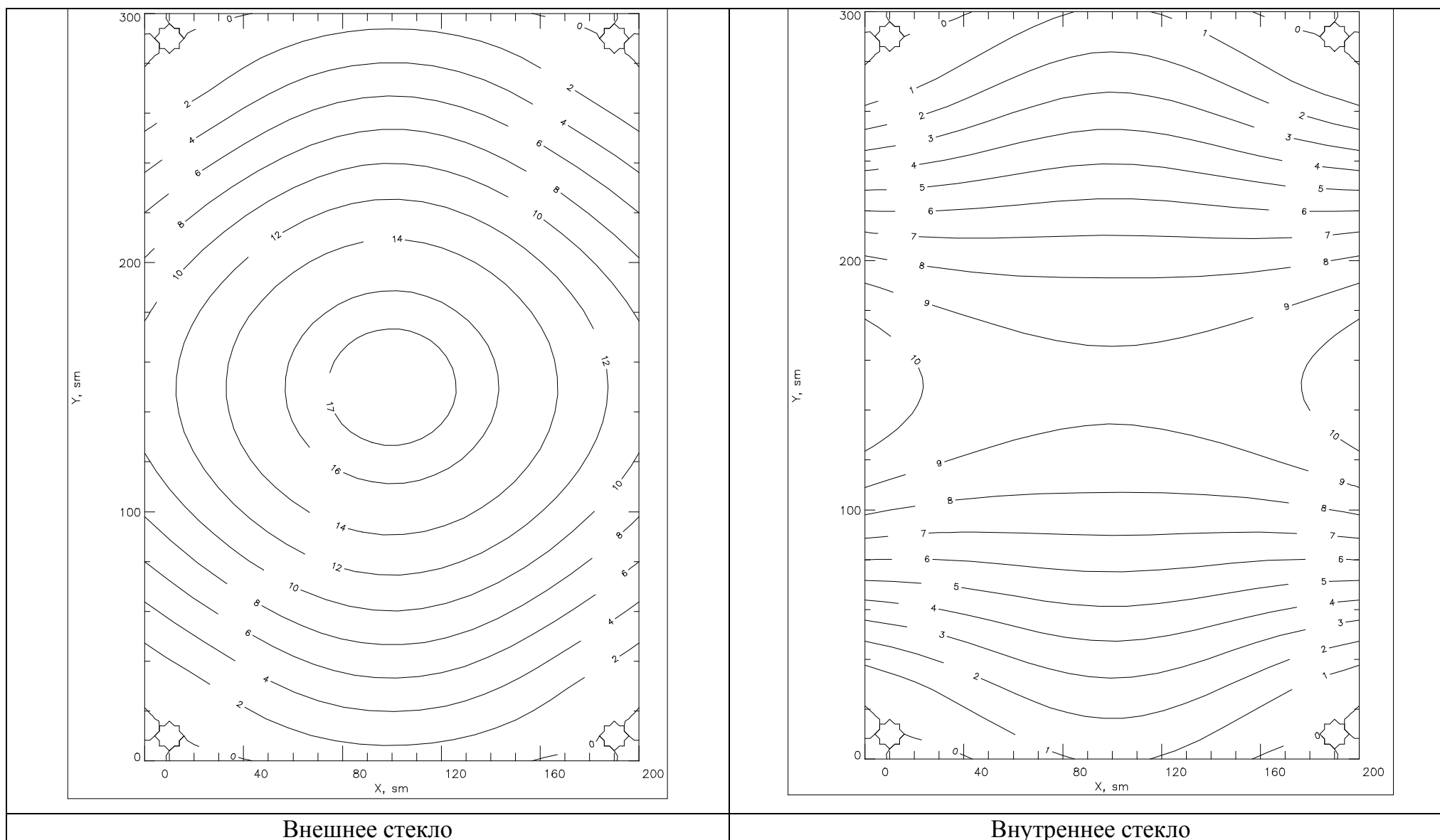
Внешнее стекло

Внутреннее стекло

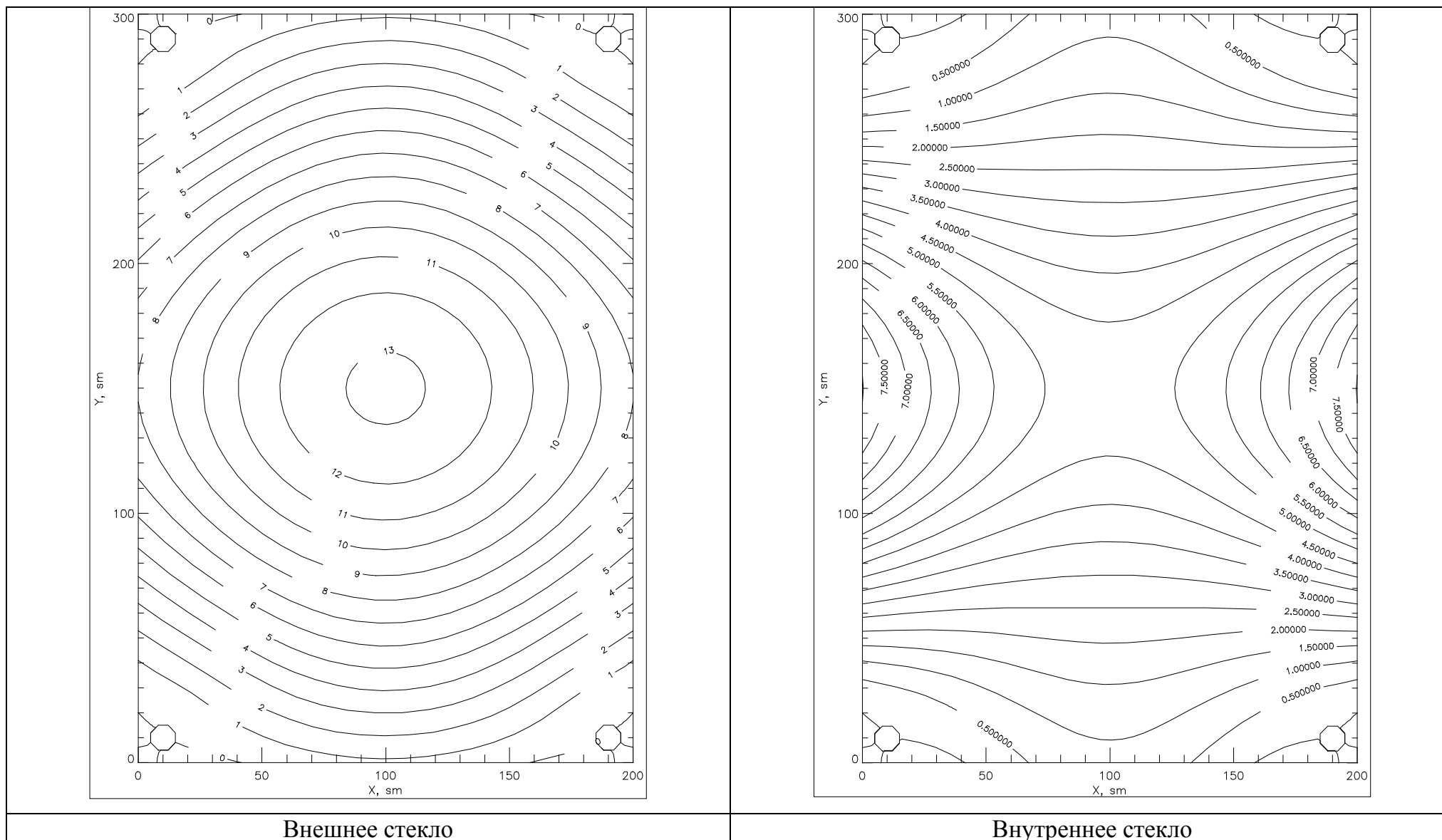
Прогибы внешнего и внутреннего стекла при точечном креплении (марка стеклопакета С4.2 по таблице 2):



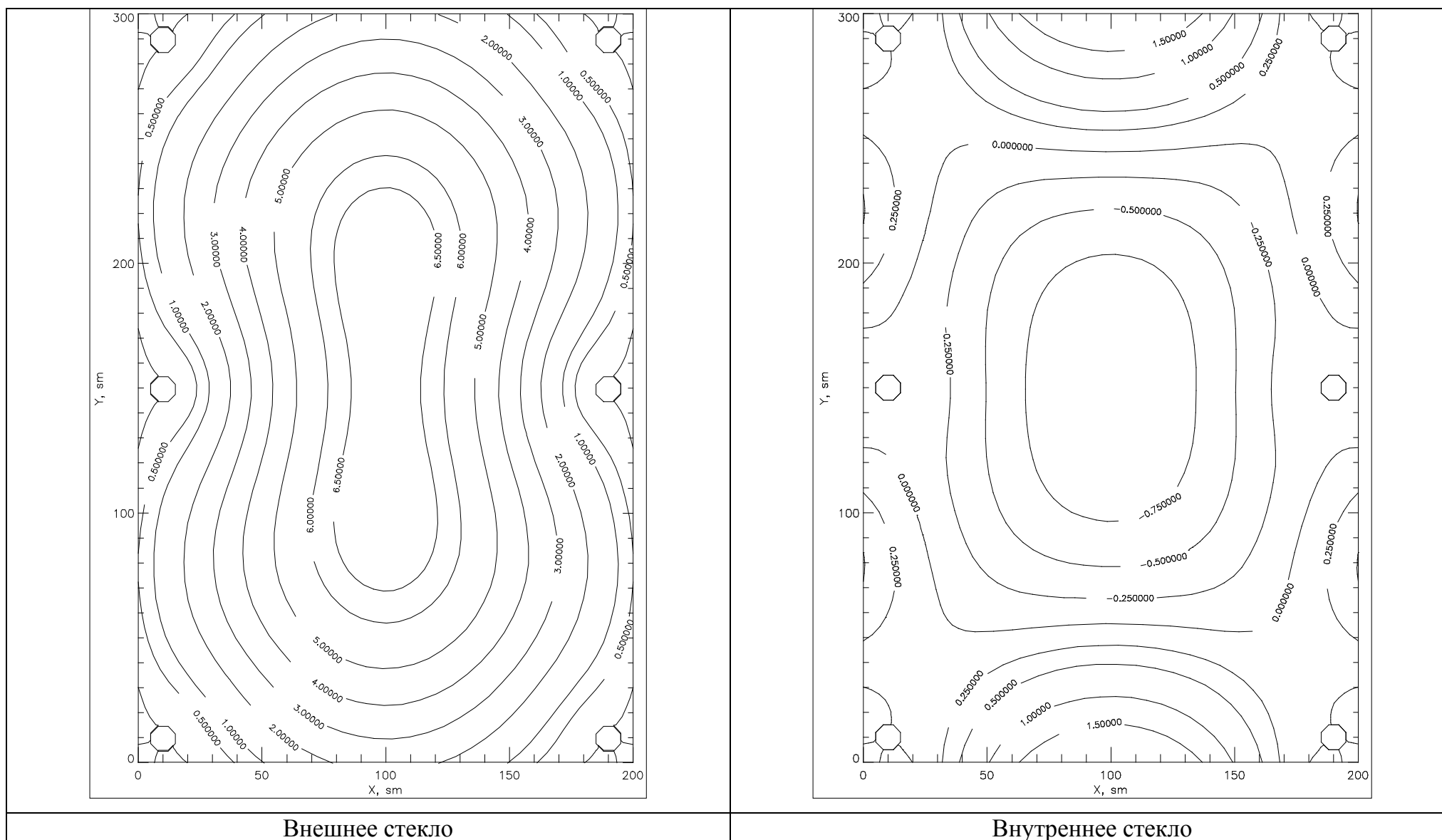
Прогибы внешнего и внутреннего стекла при точечном креплении (марка стеклопакета С4.3 по таблице 2):



Прогибы внешнего и внутреннего стекла при точечном креплении (марка стеклопакета С4.4 по таблице 2):

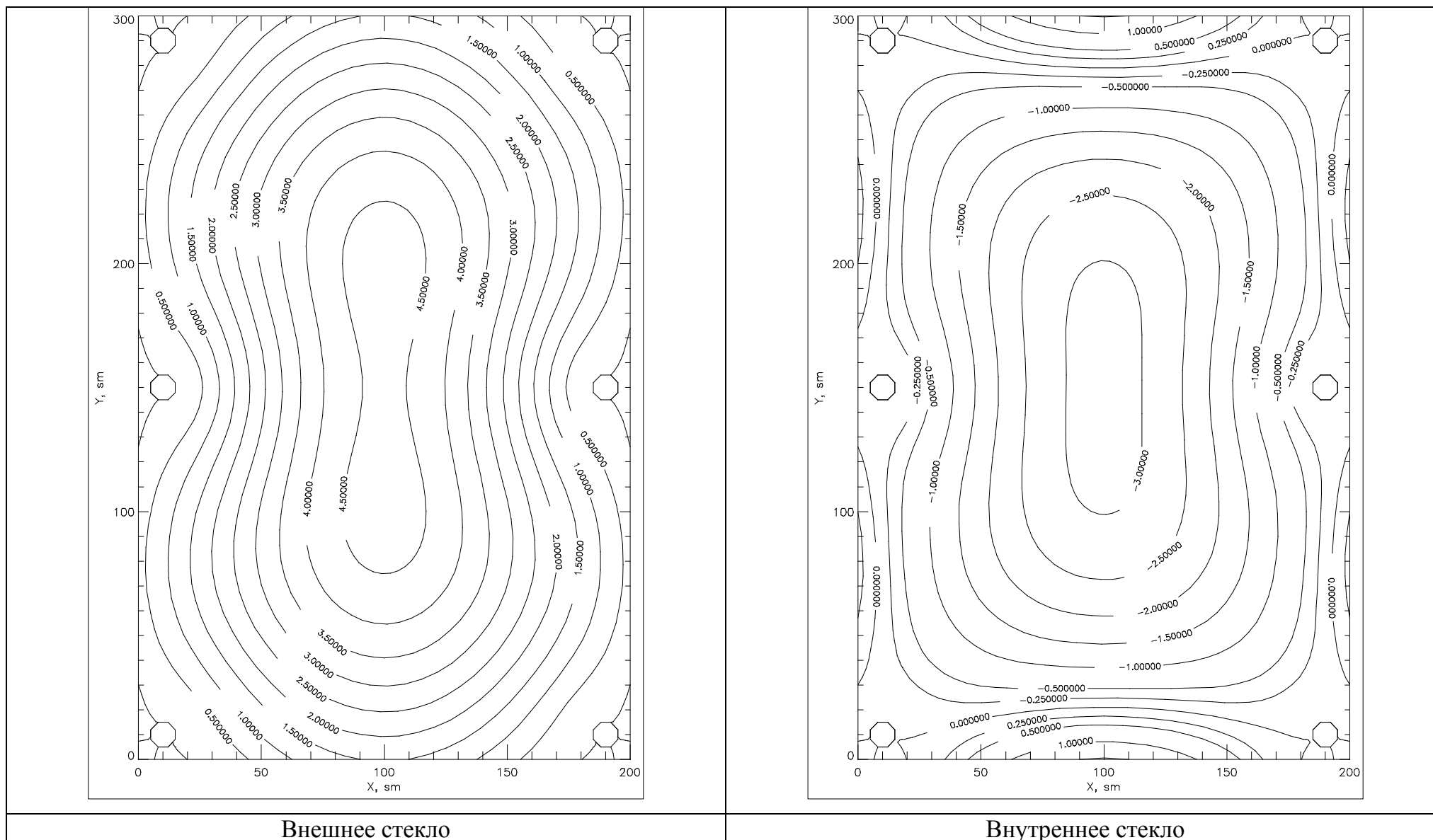


Прогибы внешнего и внутреннего стекла при точечном креплении (марка стеклопакета С5.1 по таблице 2):

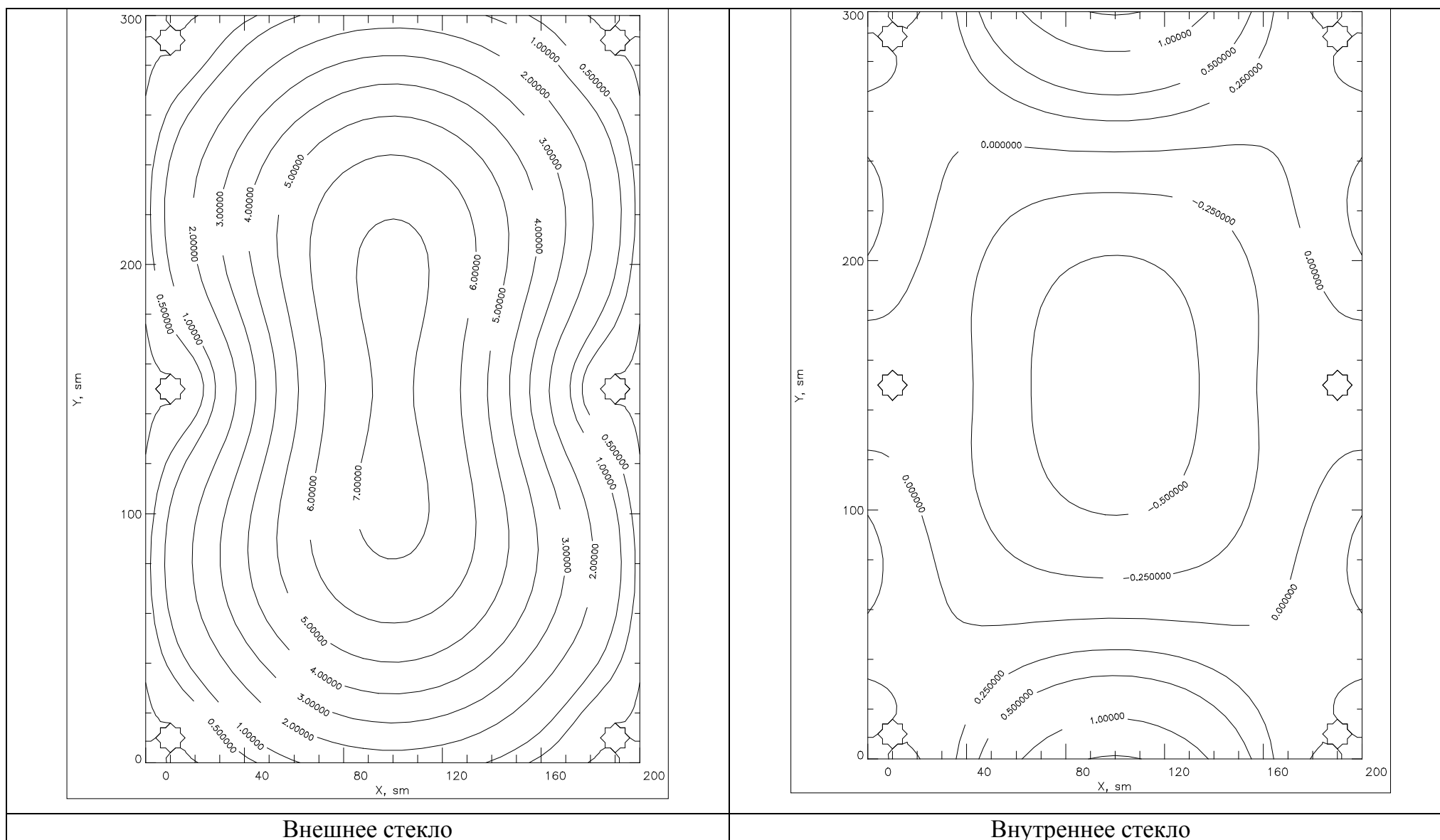




Прогибы внешнего и внутреннего стекла при точечном креплении (марка стеклопакета С5.2 по таблице 2):



Прогибы внешнего и внутреннего стекла при точечном креплении (марка стеклопакета С5.3 по таблице 2):



Прогибы внешнего и внутреннего стекла при точечном креплении (марка стеклопакета С5.4 по таблице 2):

