

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна»

На правах рукописи



Козицын Иван Петрович

РАЗРАБОТКА МЕТОДА
МОЛЛИРОВАНИЯ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА
В ВАКУУМНУЮ ФОРМУ С ЗАКРЕПЛЕННЫМ КРАЕМ

2.6.17. Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Жукова Любовь Тимофеевна

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОЛЛИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ СТЕКОЛ	12
1.1 Исторические предпосылки возникновения и современные направления применения изделий, изготовленных по технологии моллирования плоского стекла	12
1.2 Технологические параметры, определяющие процесс моллирования плоских стекол.....	20
1.3 Анализ современных способов определения вязкости стекол.....	28
1.4 Анализ современных способов механического шлифования стекла	39
Выводы по главе 1.....	45
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ ПЛОСКОГО СТЕКЛА ПРИ МОЛЛИРОВАНИИ В ВАКУУМНУЮ ФОРМУ С ЗАКРЕПЛЕННЫМ КРАЕМ	47
2.1 Разработка метода исследования вязкости плоских стекол	47
2.2 Исследование влияния геометрии формирующего элемента на процесс моллирования плоского стекла в вакуумную форму с закрепленным краем.....	53
2.3 Исследование влияния технологических параметров процесса моллирования плоского стекла в вакуумную форму с закрепленным краем.....	62
2.4 Уточнение констант для расчета вязкости по методу Охотина.....	70
2.5 Исследование процессов зависимости деформации и вязкости при вакуумном моллировании плоских стекол	76
2.6 Разработка методики определения относительной вязкости стекла	82
Выводы по Главе 2	87

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО АБРАЗИВНОГО ШЛИФОВАНИЯ СТЕКЛЯННЫХ РЕЛЬЕФОВ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	90
3.1 Разработка метода вибрационного шлифования	91
3.2 Определение оптимальных технологических параметров вибрационного шлифования	105
3.3 Исследование влияния на светопропускания стеклянного образца параметров абразива и среднего угла рельефной поверхности	111
Выводы по Главе 3	119
ВЫВОДЫ.....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	158

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Моллирование, как метод формования плоского стекла, известен уже не одно тысячелетие. Если до 20-го века он имел вспомогательное значение, как одна из стадий производства листового стекла, то с появлением современных способов изготовления листового стекла он приобрел новое направление применения. Это относится как изготовлению стекол в строительстве, созданию элементов машин и приборов, так и к изготовлению декоративно-художественных элементов.

Несмотря на усложнение требований к изделиям принципиальные приемы их изготовления остаются на прежнем уровне и сводятся в основном к методам гравитационного моллирования и плоской деформации листа стекла. В некоторых случаях в качестве вспомогательных применяют приемы механической или вакуумной деформации. При этом используется крайне узкий интервал температур для моллирования 620 – 750 °С, позволяющий проводить деформацию стекла лишь на больших радиусах кривизны. Использование преимуществ метода моллирования листового стекла для создания изделий с малыми радиусами кривизны и сложным рельефами поверхности известными методами не представляется возможным.

Одной из наиболее сложных технологических проблем при создании элементов оптических приборов является технология изготовления стеклянных широкоформатных линз Френеля и короткофокусных конденсорных линз малого диаметра.

В настоящее время широкоформатные линзы Френеля в основном изготавливаются из полимерных материалов, что не всегда удовлетворяет требуемым условиям их эксплуатации или же методом центробежного формования расплава стекла, но при этом возникают ограничения в размерах

линзы, а также в геометрии преломляющих граней.

Кроме проблем формования этих объектов из стекла, возникает проблема их прецизионного шлифования, трудозатраты которого составляют до 90% себестоимости изделия. Короткофокусные кондесорные линзы малого диаметра, требующиеся в огромном количестве смартфонов и другой бытовой технике, производятся механическим шлифованием из цилиндрических заготовок-таблеток, что значительно удлиняет процесс их формования, а также требует сложной настройки линии шлифования при каждой смене типа линз.

Основным технологическим параметром в процессе моллирования является вязкость стекла, определяющая условия протекания процесса формования и качество готового изделия. При производстве листового стекла по ГОСТ 111-2014 зависимость вязкости от температуры нормируется косвенно на основании изменения температурного коэффициента линейного расширения в диапазоне 7–9 ppm K⁻¹. Широкий разброс входящих параметров исходного материала приводит к увеличению брака в процессе моллирования листового стекла, что требует разработки методов оперативного контроля вязкости листового стекла.

Известные в настоящее время способы определения температурно-вязкостных характеристик стекла трудоемки и длительны во времени. Главной особенностью всех известных методов определения вязкости является установление абсолютных зависимостей вязкости от температуры. Для определения изменения вязкости от температуры в диапазоне 10⁶ – 10⁹ П требуется проведение достаточно большого количества экспериментов, что не удовлетворяет требованиям оперативного контроля.

После процесса моллирования листового стекла возникает необходимость обработки поверхности стекла, контактировавшей с формой. В настоящее время отсутствуют эффективные способы шлифования несимметричных стеклянных поверхностей.

Немаловажным фактором, влияющим на актуальность проблемы,

является то, что в настоящее время эти технологии практически утрачены в нашей стране и требуют не только их восстановления, но и разработки новых методов и методик формования и шлифования стекла. Это подтверждается государственной политикой РФ в исполнении указа Президента РФ от 1 декабря 2016 г. N 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации", указом Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и «Концепцией технологического развития на период до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 года № 1315-р.

Степень разработанности темы исследования

Проведенный анализ литературных источников показал недостаточную практическую проработку рассматриваемой темы. Это относится к вопросам оперативного определения вязкостно-температурных характеристик стекла в диапазоне $10^6 - 10^9$ П. Большинство заявленных решений представлено в виде патентов и относится к определению абсолютного значения вязкости стекол.

Наиболее близкой к рассматриваемой проблеме является работа В. П. Ключева по определению относительной вязкости стекла методом вдавливания конического индентора в пластины стекла. Также стоит отметить патент № 2702695 «Способ быстрого определения температурной зависимости вязкости и характеристических температур стекол и устройство для его реализации». Эти методы определения вязкости имеют существенный недостаток, так как определяют ее значение для конкретной температуры. Для определения зависимости вязкости от температуры на определенном участке требуется проведение нескольких экспериментов, что усложняет проведение оперативного контроля вязкости в производственной лаборатории. В результате возникает необходимость разработки метода экспресс-анализа

вязкости стекла.

Результаты анализа литературных источников, описывающих процессы абразивной обработки стекла и практические приемы шлифования показали, что наиболее к близким можно отнести работу И. Ю. Маслова по разработке и проектированию метода шлифования и полирования поверхностей из стекла, а также патентные решения № 137497 и 2595283, описывающие методы шлифования стеклянных поверхностей. Однако эти методы применимы только для шлифования плоскостей или фигур вращения и не применимы для шлифования несимметричных стеклянных рельефов. Недостаточно сведений о влиянии входных параметров инструментов обработки (параметры абразивного материала и механического инструмента) на светопропускание готового изделия. Это требует дополнительного исследования и разработки метода шлифования подобных стеклянных поверхностей.

Цели и задачи

Целью работы является разработка метода моллирования листового стекла в вакуумную форму с закрепленным краем для создания изделий со сложным несимметричным рельефом.

В соответствии с поставленной целью были определены и решены следующие задачи:

- установление закономерностей процесса формования листового стекла при моллировании в вакуумную форму с закрепленным краем, возникающих при деформации листового стекла;
- определение функциональных зависимостей в системе деформация-температура-вязкость для технологических параметров процесса моллирования;
- анализ процесса абразивного шлифования стеклянных рельефов с несимметричной поверхностью и установление зависимости светопропускания

стекла от параметров шлифования.

Научная новизна

1. Предложен и исследован метод моллирования плоского стекла в вакуумную форму с закрепленным краем. Представлена математическая зависимость, описывающая изменение толщины стекла в процессе моллирования от типа формы
2. Предложен относительный метод определения вязкости для стекла в диапазоне $10^6 - 10^9$ П (Пуаз, здесь и далее). Определены зависимости в системе деформация-температура-вязкость. Предложен расчет коэффициентов зависимости вязкости от температуры, дополняющий метод Охотина для диапазона $10^6 - 10^9$ П.
3. Установлены и исследованы зависимости изменения светопропускания стекол от параметров шлифования и представлена соответствующая математическая зависимость.
4. Впервые дано и научно обосновано определение «среднего угла рельефной поверхности» для несимметричного рельефа как объективного фактора его оценки.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработан метод изготовления рельефных поверхностей и объемов методом вакуумного моллирования из листового стекла с закрепленным краем, позволяющий изготавливать объемные изделия методом моллирования с малыми радиусами поверхности и с отрицательными углами моллирования.
2. Разработан способ вибрационного шлифования несимметричных рельефных стеклянных поверхностей, увеличивающий светопропускание матовых стекол с рельефной поверхностью и

дающий возможность расчета светопропускания в зависимости от технологических параметров механической обработки.

3. Разработан метод относительного определения вязкости стекла, позволяющий корректировать температуру моллирования без проведения большого количества лабораторных экспериментов.
4. Предложен метод объективной оценки светопропускания несимметричной рельефной стеклянной поверхности для оптимизации процесса механического шлифования.
5. Разработанный метод изготовления рельефных объемов был принят к внедрению на ООО «Соляной городок».

Методология и методы исследования

В качестве метода определения зависимости вязкости от температуры применялся системный анализ, включающий в себя сравнительный анализ и метод имитационного моделирования в определении зависимостей в системе вязкость-температура-деформация в интервале $10^6 - 10^9$ П, заключающийся в моделировании процесса моллирования в вакуумную форму и сравнении деформационно-температурных и температурно-вязкостных характеристик стекла с эталоном.

Для измерения светопропускания использовался спектрофотометр HAZE-GARD i.

Измерение вязкости плоских стекол осуществлялось на спроектированной установке, показанной на рисунке 1, по методике, представленной в патенте № 2796330 С1 с погрешностью измерения ± 5 %.

Для проведения термических процессов использовалась электрическая камерная печь СНОЛ 120/12-И2 с рабочей камерой 400x400x800 мм, с боковым и нижним нагревом, максимальной температурой 1200 °С и термопарой ТХА-3, терморегулятором «Варта 703-3», модернизированная для установки в печь

вакуумной формы. Погрешность измерения температуры составляет ± 1 °С.

Для создания разряжения в форме использовался вакуумный насос 2TW-3CV (VP270SG).

Расчет вязкости стекла в диапазоне $10^5 - 10^9$ П проводили интерполяцией данных метода Охотина для соответствующих стекол.

Определение состава стекла для расчета осуществлялось на рентгеновском энергодисперсионном микроанализаторе Oxford Instruments INCAx-act, Model 51-ADD0007 и автоматической напылительной установке Quorum Technologies Ltd Q150RE.

Геометрические размеры моллируемых образцов измерялись при помощи электронного штангенциркуля 31611 с погрешностью измерения 0.02 мм, глубиномера микрометрического ГМ 100, ГОСТ 7470-92, D102009, микрометра МК-50 ГОСТ6507-78

Положения, выносимые на защиту

1. Моллирование плоского стекла в вакуумную форму с закрепленным краем, обоснование зависимости изменения геометрии от параметров моллирования и свойств стекла.
2. Косвенное определение вязкости стекла по стеклу-эталону, для получения закономерностей моллирования плоских стекол в диапазоне $10^5 - 10^9$ П.
3. Оптимизация метода шлифования несимметричных стеклянных рельефов.
4. «Средний угол рельефной поверхности» как объективный фактор оценки рельефа.

Степень достоверности и апробации результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительный отклик: на заседаниях кафедры

технологии художественной обработки материалов и ювелирных изделий СПбГУПТД, на Всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов» (СПб, 2021-2023), на Всероссийской научно-практической конференции и смотр-конкурсе творческих работ студентов, магистров и аспирантов по направлению «Технология художественной обработки материалов» (СПб, 2021-2023), на всероссийской научно-практической конференции «Технология художественной обработки материалов» (Ростов-на-Дону, 2023), на всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современное состояние и перспективы дизайн-образования» (Иркутск, 2023).

Степень достоверности результатов подтверждается осуществлением комплексных исследований с использованием современных физико-механических методов анализа, воспроизводимостью экспериментальных данных и соответствием результатов современному уровню знаний, представленными в публикациях других ученых.

По теме диссертационной работы опубликовано 14 научных публикаций, включая 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 1 статья в международной базе Scopus и 1 монография. Получено 3 патента на изобретения.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОЛЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ СТЕКОЛ

1.1 Исторические предпосылки возникновения и современные направления применения изделий, изготовленных по технологии моллирования плоского стекла

История возникновения процесса моллирования намного опережает появление технологии изготовления листового стекла. Появление моллирования (от латинского «*mollio*» – размягчать) как процесса, связанного непосредственно с пластической деформацией листовых заготовок стекла, может быть отнесено к периоду Птолемеевского Египта 3 – 2 вв. до н.э. К артефактам того времени относятся так называемые «ребристые чаши», современная технологическая интерпретация изготовления которых показана на рисунке 1.1 [1]. Из представленного процесса пластического формования видно, что основные технологические приемы были известны уже в античное время.

С возникновением технологии выдувания стекла, на границе нашей эры, возник новый способ изготовления листового оконного стекла [2], один из этапов которого, а именно раскрытие цилиндрической заготовки, также может быть рассмотрен как процесс моллирования плоского стекла, как показано на рисунке 1.2.

Упоминания об использовании плоских стекол в быту Римской цивилизации находят не только в литературных источниках того времени, но это также подтверждают археологические находки [3].

Однако, революционная в то время технология выдувания стекла почти на две тысячи лет вытеснила пластическое формование стекла во вспомогательные стадии производства и практически до конца 19 века моллирование плоского стекла существовало только как элемент производства листового стекла «методом раскрытия полого цилиндра».



а



б



в



г



д



е

Стадии изготовления плоской заготовки: а,б,в – формирование плоской заготовки ; г – укладывание разогретой заготовки на формирующий элемент; д – моллирование чаши; е – готовая «ребристая чаша»

Рисунок 1.1 – Современная интерпретация изготовления античной «ребристой чаши» методом моллирования плоской стеклянной заготовки.

Вторая половина 19 века характеризовалась бурным развитием как социальным, промышленным так и научным. Это способствовало и стекольного производства. Переходный метод вытягивания стеклянных

цилиндров Дж. Любберса [4] являлся продолжением способа производства листового стекла методом раскрытия полого цилиндра, так как процесс осуществлялся в правильных печах методом пластической деформации разрезанного вдоль цилиндра, т.е. моллированием. Однако моллирование плоского стекла, как самостоятельного технологического процесса практически не имело места.

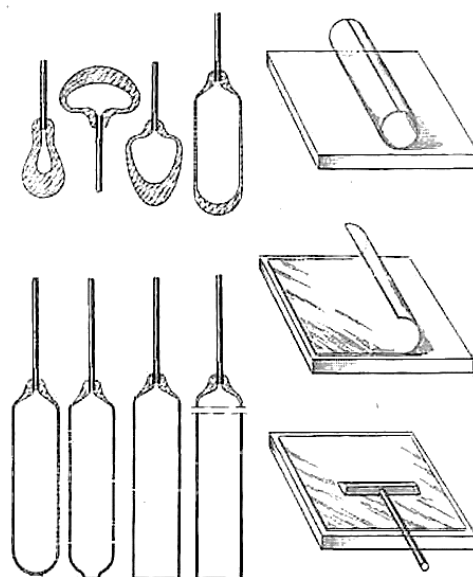


Рисунок 1.2 – Схема изготовления плоского стекла методом раскрытия полого цилиндра

Параллельные и последующие изобретения ленточного вытягивания стекла У. Кларка 1857, Ф. Вэллина 1971 и Э. Фурко 1903 полностью вытеснили стадию моллирования из процесса производства листового стекла [4].

К одному из первых современных применений моллированного стекла в архитектуре можно отнести застекление окон выпуклыми стеклами, датируемыми серединой 19 века, примером которого могут служить окна Марфо-Мариинской обители в Санкт-Петербурге, годы постройки которой датируются 1850 – 1860 гг. и показанное на рисунке 1.3. Функциональное назначение подобного остекления может быть рассмотрено как противовеетровое [5].

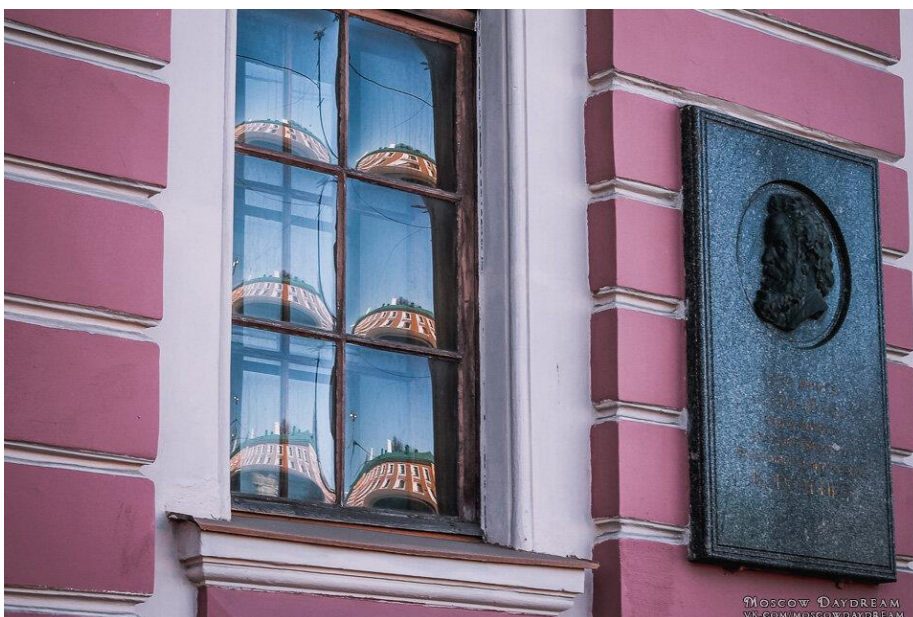


Рисунок 1.3 – Моллированные оконные стекла Марфо-Мариинской обители. Санкт-Петербург, годы постройки 1850-1860

В первой половине 20 века технология моллированного стекла получила дальнейшее развитие. Это было связано не только с развитием автомобильного транспорта и авиации. Значительное влияние на развитие технологического процесса моллирования имело развитие дизайна в таких отраслях, как строительство, мебельная промышленность, а также художественное стеклоделие.

Эпоха Модерна, основой которой являлись плавные линии и сопряжения, стала основой для возрождения технологии пластической деформации стекла.

Современные направления применения моллирования плоских стекол могут быть разделены на следующие направления как показано на рисунке 1.4.

Основные эксплуатационные требования, предъявляемые к моллированным стеклам, определяются ГОСТ 11485-2-2016 «Стекло моллированное [6]. Технические требования», а также ГОСТ 11485-1-2016 «Стекло моллированное. Термины и определения» [7]. Эти требования определяются в первую очередь эксплуатационными характеристиками того или иного изделия: форма, геометрические размеры и допуски, параметры

светопропускания. Кроме того, на моллированные стеклянные изделия распространяются ГОСТы, определяющие прочностные характеристики и другие физические свойства, определяемые условиями эксплуатации стекла [8-10].

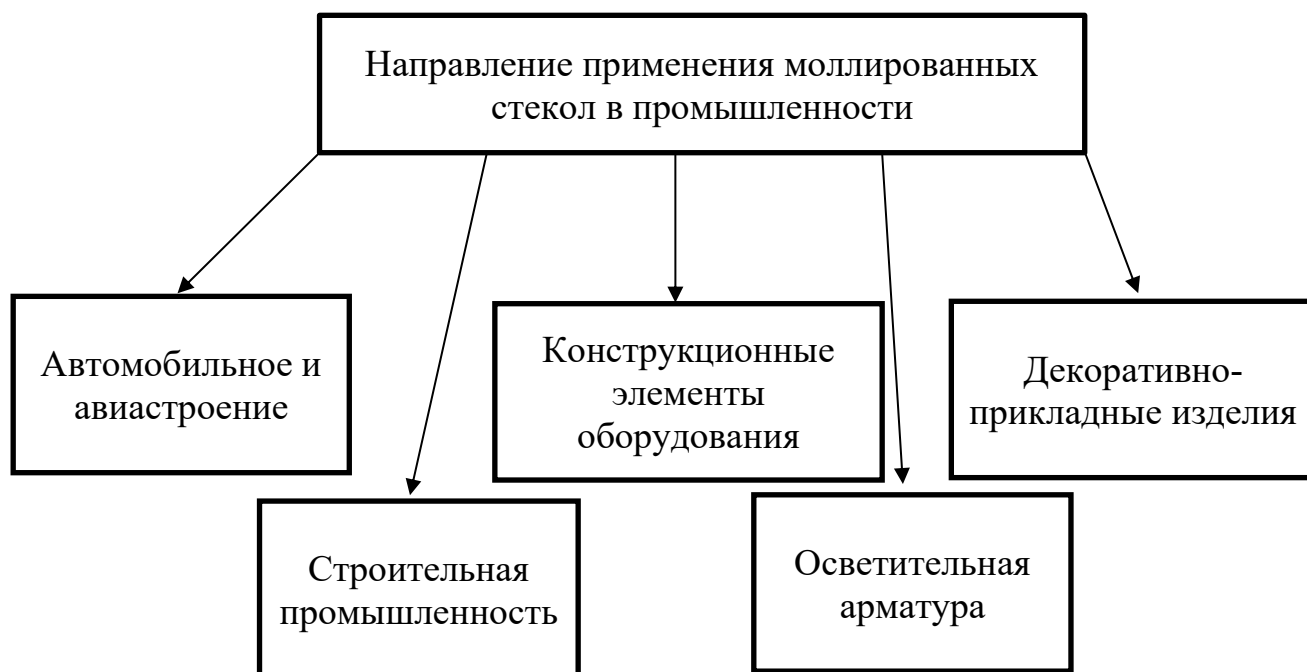


Рисунок 1.4 – Направление применения моллированных стекол в промышленности

Придание стеклам дополнительных прочностных, оптических и декоративно-художественных решений также накладывает дополнительные требования к технологическому процессу моллирования стекла [10].

Наиболее распространенными моллированными стеклами в строительстве и транспорте являются стекла арочного типа с постоянным радиусом кривизны. При этом габариты изделия, как правило, определяются технологическими возможностями оборудования. Примеры применения моллированного стекла в строительной отрасли приведены на рисунке 1.5 [11].



а



б

Примеры: а – экстерьер; в – интерьер

Рисунок 1.5 – Применения моллированных стекол в строительной отрасли

Развитие технологии моллирования в автомобильной и авиационной промышленности определялось в первую очередь совершенствованием техники и увеличением скорости ее передвижения. Кроме дополнительных прочностных характеристик к этим моллированным изделиям добавились требования обеспечения обтекания потока воздуха при быстром перемещении машины.

Этот фактор потребовал создания технологии деформации плоского стекла в двух плоскостях, что значительно усложняло установку стекла в элементы корпуса аппарата. С другой стороны, выгнутое в двух плоскостях стекло значительно увеличивало сопротивление ударным нагрузкам [12].

Значительную роль в создании лобовых стекол автомобилей играет и разработка дизайна самого автомобиля. Огромное количество дизайнерских решений экстерьеров автомобилей подразумевают изготовления индивидуальных стекол не только для каждой марки, но и практически для каждой новой серии.

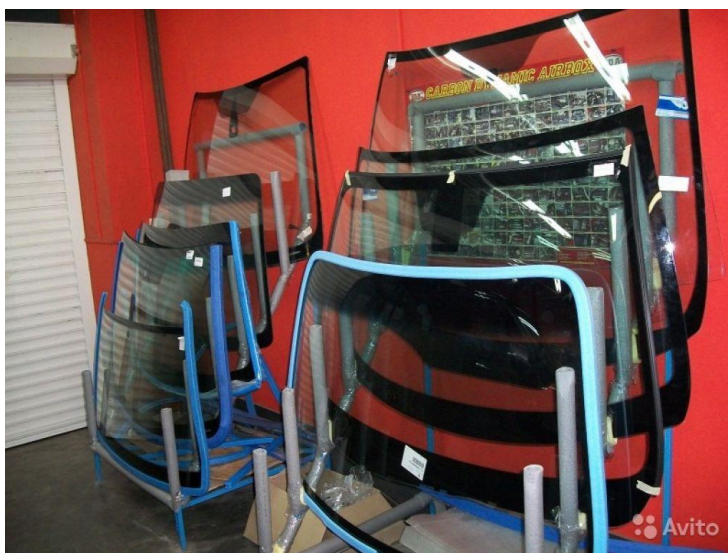


Рисунок 1.6 – Примеры современных лобовых стекол автомобиля

Так как стекло обладает уникальными эксплуатационными свойствами, в современном мире оно нашло применение как конструкционные элементы оборудования. К ним можно отнести элементы мебели, всевозможные витрины, защитные корпуса и крышки для оборудования, которые требуют прозрачности. Современные способы обработки стекла такие как ламинирование, различные способы закалки, позволяют улучшить эксплуатационные свойства элементов, изготовленных методом моллирования стекла.

Создание подобных элементов обуславливают разработку не только индивидуальной оснастки для моллирования, зачастую с динамическими элементами, но и модификации печи моллирования дополнительными элементами, обеспечивающими индивидуальные зоны нагрева стекла. Индивидуальность подхода к каждому изделию как в оснастке и оборудованию, так и в технологических режимах моллирования не позволяет обеспечить массовое производство элементов и концентрирует его на небольших производственных предприятиях и мастерских. На рисунке 1.7. показаны примеры конструкционных элементов из листового стекла, изготовленных методом моллирования.

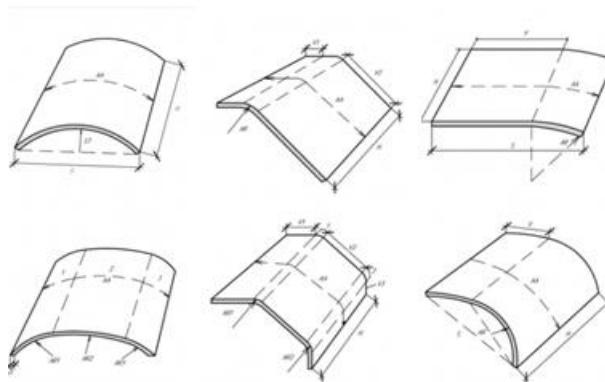


Рисунок 1.7 – Примеры различных конструктивных элементов, изготовленных методом моллирования листового стекла

Важной областью применения моллированных элементов является изготовление осветительной арматуры. Одной из проблем в создании плафонов или отражателей методом выдувания или прессования является ограниченность в размерах. Субъективная сложность ручного выдувания изделий больших размеров, высокая стоимость оснастки и оборудования изготовления больших изделий методами центробежного формования или прессования и незначительное количество требуемых в результате изделий не позволяет организовать массовое производство стекла для применения процесса моллирование этой области стеклоделия.

Основные требования, предъявляемые к моллируемому стеклу для осветительной арматуры, сводятся к заданной степени светопропускания, термостойкости и геометрических размеров, связанных с оптическими характеристиками системы, но при этом относительная простота изготовления плафонов методом моллирования ограничивается простотой форм, которые так или иначе сводятся к элементам полусферы или цилиндра [13]. На рисунке 1.8. представлены примеры изготовления плафонов методом моллирования.

Развивающимся направлением моллирования плоских стекол является дизайнерское направление. Современные тенденции совмещения дизайнерских и технологических решений позволяют осуществлять многие, не доступные ранее идеи [14].



Рисунок 1.8 – Электротехнические плафоны, изготовленные методом моллирования плоского стекла

Отдельно можно выделить развитие декоративно-прикладного искусства. Значительное количество публикаций [15,16,17] говорит о серьезной научной работе в этой области. Однако отсутствуют сведения о технологическом процессе их изготовления.

1.2 Технологические параметры, определяющие процесс моллирования плоских стекол

К технологическим параметрам можно отнести все факторы, влияющие на процесс формообразования изделия из плоского стекла при моллировании. Их можно разделить на:

- термические, влияющие на вязкостные характеристики моллируемого стекла;
- физические, формообразующие элементы для моллирования и элементы механического воздействия на пласт деформируемого стекла;
- временные, определяющие длительность протекания каждой стадии процесса моллирования.

Как известно [18] изотропные свойства стекла обуславливаются однородностью состава при условии отсутствия термических и механических

напряжений и дефектов. Температурный интервал, в котором происходит процесс моллирования плоских стекол, ограничен температурами T_g – состоянием твердого упругого состояния и T_f – границей пластического состояния.

Свойства стекол можно разделить на три группы [19]:

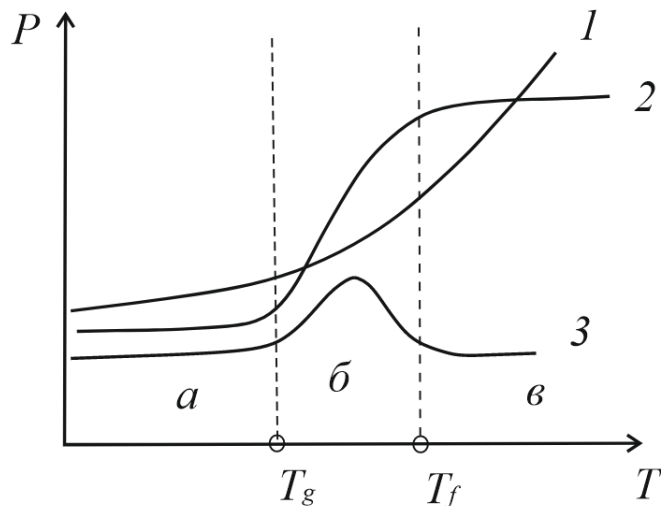
- свойства, характеризующие функциональное состояние материала (внутреннюю энергию E , энтальпию H , энтропийное состояние S , удельное электрическое сопротивление стекла ρ , а также кинетические свойства такие как вязкость η);
- свойства материала, определяемого как первая производная по температуре dP/dT от функционального состояния материала (свойств первой группы). К ним относятся теплоемкость, а также термическое расширение;
- свойства материала, которые можно определить как вторую производную dP^2/dT^2 по температуре и в первую очередь – теплопроводность материала.

На рисунке 1.9. показаны схематические зависимости функциональных свойств стекла и их производные по температуре [20].

Изменение свойств этих трех групп в интервале $T_g - T_f$ различно. Если первая группа свойств изменяется плавно по установленным закономерностям, то вторая группа имеет в этом интервале точку перегиба, которая соответствует экстремальному значению третьей группы свойств материала. Значения температур для промышленных стекол T_g и T_f определяются химическим составом стекла и соответствуют интервалу температур $550 - 720$ °С, а в вязкостном выражении $10^{12} - 10^8$ П.

Стоит отметить, что граничные состояния материала, особенно в зоне перехода из пластичного в жидкое состояние, является наиболее интересным для исследования пластической деформации стекла, поскольку современные стекольные технологии используют эту область температур только для формования простых форм: листового стекла, стеклодрота и стеклянной трубки

[21,22,23], но не используют для изготовления сложных по форме и фактуре изделий.



1 – зависимость исходной функции P ; 2 – зависимость первой производной dP/dT ; 3 – зависимость второй производной d^2P/dT^2 ; а – интервал твердотупругого; б – пластичного; в – жидкого состояния

Рисунок 1.9 – Схематические зависимости свойств стекла от температуры

Важнейшей характеристикой процесса формования является изменение вязкости стекла в зависимости от температуры $\Delta\eta/\Delta T$ – температурный градиент вязкости, характеризующийся изменением вязкости от температуры, а также скоростью изменения вязкости от времени $\Delta\eta/\Delta\tau$, определяющей время формования изделия, и как отмечалось выше, эти свойства определяются составом стекла.

Однако вязкостные характеристики выпускаемых промышленных стекол нормируются по ГОСТ 111-2014 «Стекло листовое» [8] лишь косвенно в виде коэффициента термического линейного расширения и в очень широком диапазоне $7 - 9 \text{ ppm } ^\circ\text{C}^{-1}$. Это позволяет предприятиям, выпускающим листовое стекло, варьировать состав стекла, не нарушая при этом требований ГОСТа. В таблице 1.1. приведен анализ листового стекла, присутствующих на российском рынке.

Из представленных в таблице 1.1. данных видно, что массовые составы

компонентов стекол могут варьироваться в пределах 1 – 2 %, что может заметно влиять на термические и вязкостные свойства стекол.

Таблица 1.1 – Анализ составов листового стекла

№ образца	Химический состав и массовый %										
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Всего
1	14.22	3.96	0.69	72.52	0.20	0.03	0.12	8.14	0.07	0.05	100.00
2	13.62	3.81	0.89	72.68	0.22	0.04	0.10	8.62	0.03	0.08	100.00
3	13.99	4.48	0.48	72.15	0.22	0.01	0.13	8.41	0.01	0.01	100.00
4	13.18	3.50	0.90	72.87	0.24	0.02	0.15	9.06	0.02	0.06	100.00
5	13.16	4.19	0.44	72.39	0.23	0.01	0.19	9.31	0.02	0.07	100.00
6	13.22	4.06	0.95	71.61	0.27	0.01	0.18	9.60	0.01	0.09	100.00
7	13.94	2.85	1.07	72.45	0.25	0.03	0.16	9.13	0.04	0.08	100.00

Это требует от предприятия, занимающегося моллированием листового стекла проведения экспериментальных процессов моллирования для уточнения температурных режимов. Как показывает практика, подобные отклонения могут наблюдаться не только у разных производителей стекла, но и в партиях одного завода изготовителя.

Этот параметр неопределенности состава требует разработки метода оперативного определения температурно-вязкостных характеристик, поступающего на стадию моллирования стекла.

Вторым технологическим фактором, влияющим на процесс формообразования изделия, является механический фактор, включающий в себя, как особенности строения формы для моллирования, а также дополнительные механические усилия, прилагаемые для деформации стекла (механическое, разряжение в форме и наличие элементов печи для создания дополнительных температурных градиентов).

К моллированным деталям, согласно ГОСТ 111-2014, предъявляются строгие требования к геометрическим параметрам.

Это определяется геометрией и устройством формы. Примеры форм для

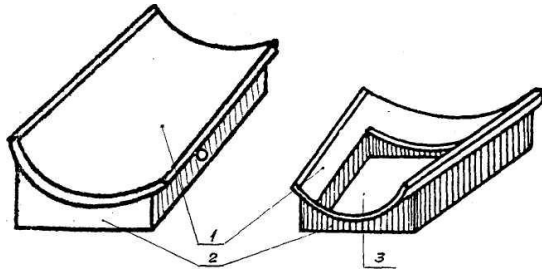
моллирования показаны на рисунке 1.10 – 1.12.

Все формы имеют индивидуальное решение и могут быть использованы для изготовления только одного типа изделий. В [24,25,26,27] представлены различные патентные решения для форм моллирования изделий различного назначения.

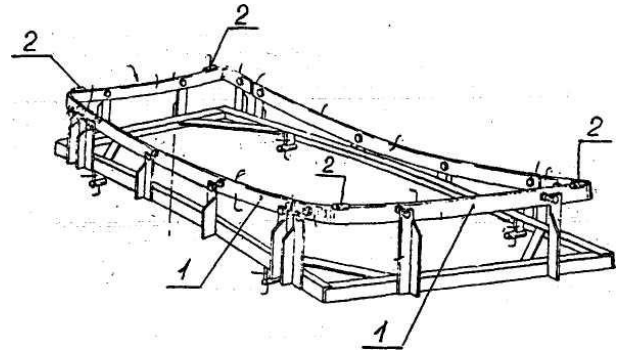
Представленные на рисунках 1.10 – 1.12 формы предназначены для процессов гравитационного моллирования, суть которых заключается в формировании плоских стекол под действием силы тяжести. При этом температуры формирования лежат в пределах 620 – 660 °С. Это, как правило, формы арочного типа с радиусом кривизны не менее 500 мм. Это относится как к стеклам для автомобильной промышленности, так и к строительной отрасли.

Данные формы имеют «свободный край», т.е. край формируемого стекла в процессе моллирования может перемещаться от вертикальной проекции, принимая геометрию конечного изделия. Исходная геометрия плоского листа рассчитывается, исходя из размеров конечного изделия. Данный инструмент формирования применяется для крупногабаритных изделий с большими радиусами кривизны.

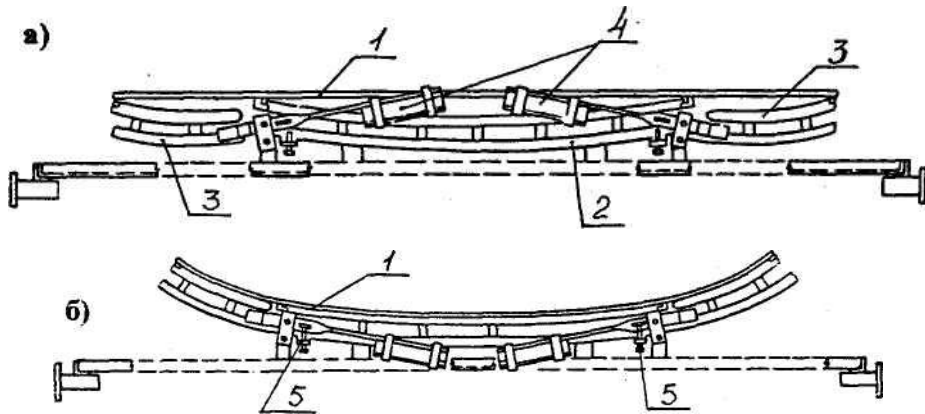
Для моллирования изделий с радиусом кривизны <500 мм или изделий сложной конфигурации используют методы принудительной деформации заготовки под механическим или атмосферным давлением. При этом, каждое устройство имеет индивидуальное решение и, как правило, защищено патентом [28,29,30]. На рисунке 1.13. представлена форма для моллирования отражателей переменной кривизны поверхности со «свободным краем» предложенный в [28]



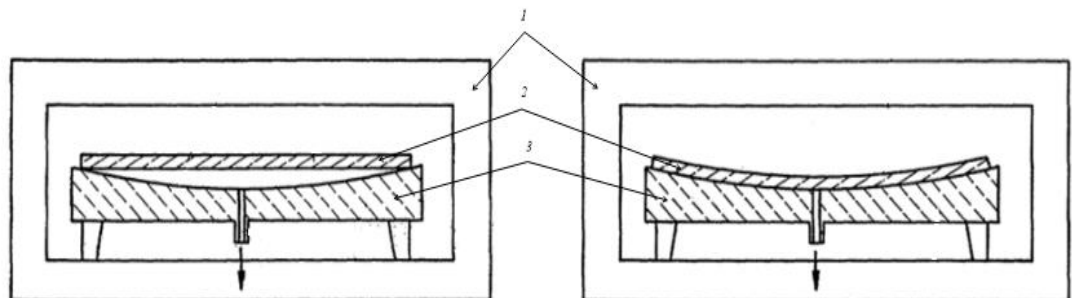
1 – ложе; 2 – опора; 3 – проем
Рисунок 1.10 – Чугунная форма
для моллирования



1 – ножи габарита формы; 2 – опорные
точки для листа стекла
Рисунок 1.11 – Ножевая форма для
моллирования



а – до изгибания стекла; б – после окончания моллирования; 1 – лист
стекла; 2 – неподвижная часть рамки; 3 – вращающиеся элементы
формы; 4 – противовесы; 5 – ограничители движения боковых элементов.
Рисунок 1.12 – Шарнирно-рычажная рамка для моллирования



1 – камера нагрева; 2 – моллируемое стекло; 3 – вакуумная форма
Рисунок 1.13 – Вакуумная форма для моллирования плоского стекла со
«свободным краем»

Данный способ применяется для изготовления выпуклых фигур вращения с переменным или строго фиксированным радиусом кривизны, например, для светоотражателей прожекторов.

Более сложные по кривизне изделия, например, выпуклые лобовые стекла для автомобилей могут быть изготовлены методом, представленным в [29], схема которого показана на рисунке 1.14. Разогретый до температуры 580 – 620 °С стеклянный пакет 2, помещают на форму 3. Осуществляют дополнительный подогрев 4. Пресс 1 с пуансоном формирует внутреннюю криволинейную поверхность стеклопакета. После формования пресс с пуансоном 1 поднимается в верхнее положение и стеклопакет 2 перемещается в зону отжига печи.

Подобный способ прессования наиболее удобен при изготовлении криволинейных стекол, используемых в дальнейшем для формирования ламинированных стеклопакетов, так как оба стекла формируются одним движением и в точности повторяют рельеф друг друга.

В литературных источниках встречается описание установки для создания стекол со сложными криволинейными поверхностями с использованием многозонного нагрева [31], как показано на рисунке 1.15. Сущность процесса состоит в том, что внутри печи создаются термические зоны с дополнительным градиентом температур, расположенные вблизи формы с элементами наименьшего радиуса кривизны поверхности.

Это позволяет изготавливать изделия с радиусами кривизны до 50 мм, недоступными другими способами. Недостатком данного метода является возможность изготавливать стекла, имеющие только одну плоскость кривизны поверхности.

Третьим, не менее важным, технологическим фактором процесса моллирования является время. Продолжительность процесса моллирования зависит от вязкостных характеристик стекла и может быть условно представлена как:

$$\tau = f(\eta) = f(T) \quad (1.1)$$

где τ – время моллирования;

$f(\eta)$, $f(T)$ – функциональные зависимости вязкости и температуры.

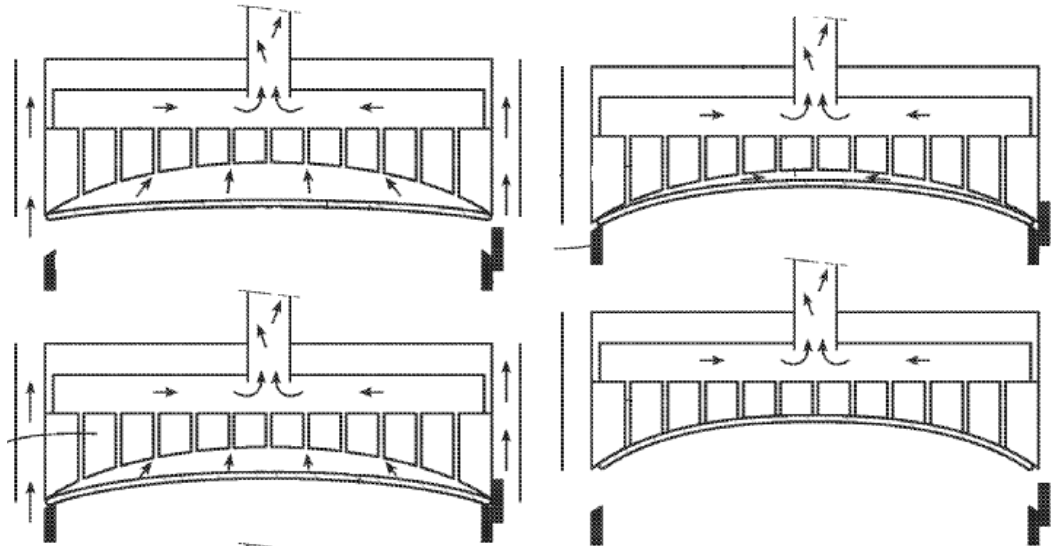
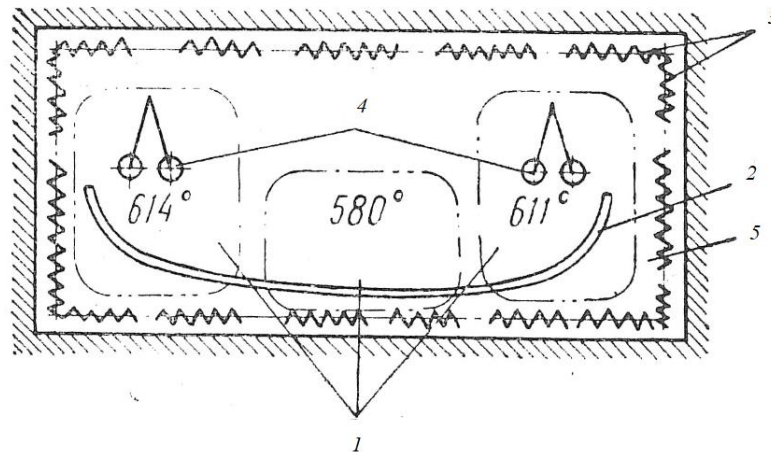


Рисунок 1.14 – Схема формирования сложнопрофильных стеклянных элементов автомобилей вакуумным способом



1 – зоны прогрева стекла; 2 – моллируемое стекло; 3 – нагреватели общего нагрева печи; 4 – элементы зонного нагрева; 5 – камера моллирования

Рисунок 1.15 – Схематическое устройство печи моллирования с дополнительными зонами прогрева стекла

Сложность математического моделирования деформации плоского стекла для моллирования определяется большим количеством факторов,

влияющих на технологический процесс [32]. В работе [33] рассмотрены математические модели моллирования стекла при плоскостном изгибе при температурах 620 – 650 °C и выдержках до 3000 с.

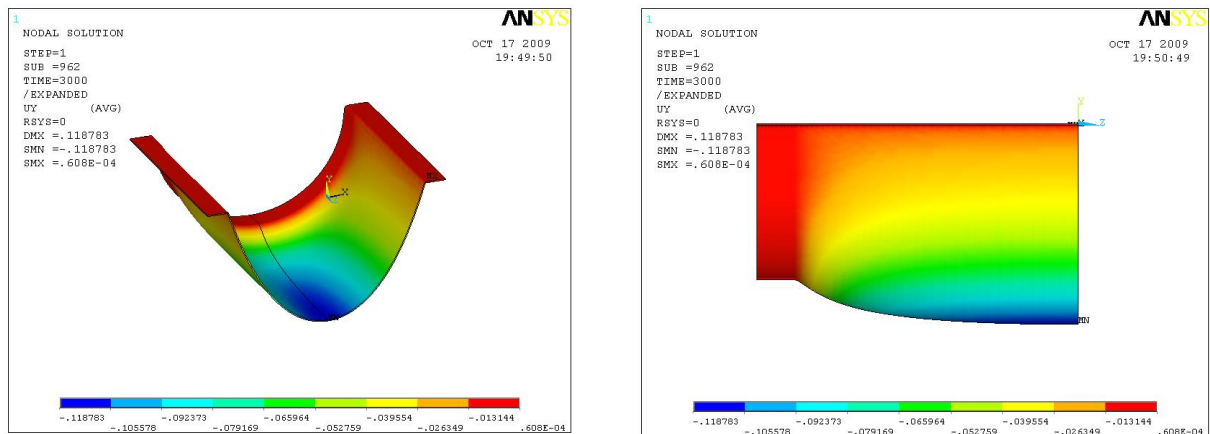


Рисунок 1.16 – Поле поперечных перемещений моллируемого стекла при $T = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$, времени выдержки $\tau = 3000\text{ с}$.

Длительные выдержки при низких температурах моллирования позволяют избежать зон кристаллизации стекла, но не позволяют создавать сложных рельефных поверхностей. Подобный способ моделирования позволяет оценить изменение толщины стекла при моллировании с закрепленным краем. К недостаткам подобного метода моделирования можно отнести невозможность создания универсальных технологических рекомендаций при проведении процесса моллирования. При этом временной фактор выдержки на стадии изгиба стекла становится определяющим.

1.3 Анализ современных способов определения вязкости стекол

Вязкость стекла является определяющим технологическим фактором процесса моллирования. Современные производители листового стекла практически не нормируют показатель вязкости стекла [8], поэтому его оперативное определение в производственной лаборатории для рабочего

диапазона температур необходимо для своевременной коррекции параметров режима моллирования и снижения количества брака.

В классическом варианте, коэффициент динамической вязкости рассматривается как [34]:

$$H = F/S \cdot \Delta y / \Delta x \quad (1.2)$$

где F/S – величина сдвигающей силы, действующей на единицу площади (площадь равна S), для того чтобы создать на расстоянии Δy между слоями жидкости перепад скорости их относительного смещения, равный Δx .

На этой классической формуле основываются все практические способы определения вязкости стекла.

Рассмотрим известные способы определения коэффициента для интересующего нас диапазона вязкости $10^5 - 10^9$ П, находящегося на границе пластического и жидкого состояния стекла.

Установка для определения вязкости по скорости удлинения стеклянной нити показана на рисунке 1.17 [35].

Вязкость в интервале $10^7 - 10^{14}$ П может быть определена по скорости равномерного удлинения стеклянной нити 1 диаметром 1–2 мм и длиной 80–150 мм. Нить устанавливается в вертикальной трубчатой печи 3в зажимы 2, нагревается до исследуемой температуры. Затем к нижнему подвесу прилагается усилие в виде подвешенного груза. В ходе эксперимента, кроме фиксированных параметров l – длины нити, r – диаметра, P – приложенной нагрузки, регистрируется скорость удлинения $\Delta l / \Delta \tau$ стеклянной нити.

Величину вязкости рассчитывают по следующей формуле

$$\eta = \frac{P \cdot g \cdot l_0 \cdot \tau}{3\pi \cdot r^2 \Delta l}, \quad (1.3)$$

где η – вязкость, Па·с;

P – нагрузка, прилагаемая к образцу (нагрузка определяется как сумма массы груза, нижнего держателя и половины массы образца), кг;

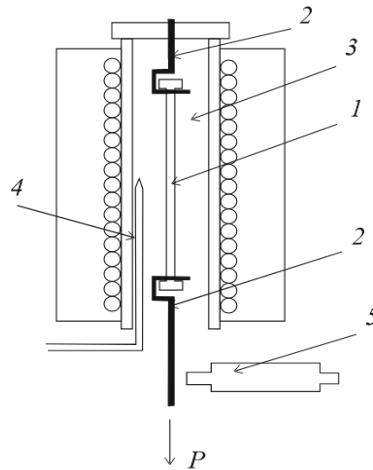
g – ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/сек²;

l_0 – длина образца между шариками, м;

τ – время опыта (время прохождения риски определенное количество делений шкалы), с;

r – радиус образца, м;

Δl – удлинение образца, м.

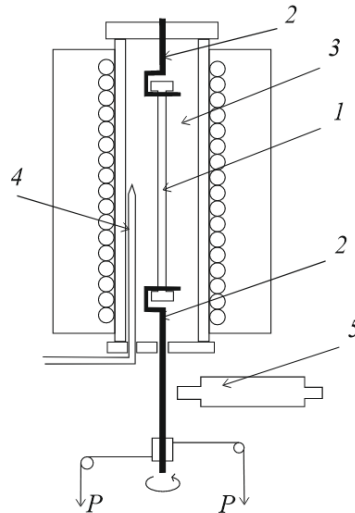


1 – испытуемый образец; 2 – кварцевые фиксаторы нити; 3 – трубчатая печь;
4 – термопара; 5 – фиксирующий микроскоп; P – приложенное усилие

Рисунок 1.17 – Схема установки для определения коэффициента динамической вязкости методом вытягивания нити

Недостатком данного метода является тот факт, что для выявления каждой температурной точки требуется отдельный образец стекла.

Установка для определения коэффициента динамической вязкости стекла методом закручивания штабика, усовершенствованная в дальнейшем М. В. Охотиным [36], показана на рисунке 1.18. Этим способом определяют вязкость в интервале $10^6 - 10^{14}$ П по углу закручивания стеклянного штабика 1, установленного в фиксаторах 2 в трубчатую печь 3. К нижнему креплению приложено касательное усилие P . Кроме фиксированных параметров геометрии образца и прилагаемого усилия в ходе эксперимента фиксируется изменение угловой скорости вращения.



1 – испытуемый образец; 2 – кварцевые фиксаторы штабика;
3 – трубчатая печь; 4 – термопара; 5 – фиксирующий микроскоп;
 P – приложенное усилие

Рисунок 1.18 – Схема установки для определения коэффициента динамической вязкости методом закручивания штабика

Расчет коэффициента динамической вязкости осуществляется по формуле:

$$H = 2LPdg/\pi r^4 \omega, \quad (1.4)$$

где L – длина стержня (15 – 20 мм);

P и d – масса груза и плечо его приложения;

g – ускорение силы тяжести;

r – радиус стержня (1,5 – 3,0 мм);

ω – угловая скорость закручивания.

К достоинства данного метода можно отнести то, что на одном образце можно провести испытания в широком диапазоне температур. Недостатком метода является необходимость компенсации наличия трения в системе.

В настоящее время во всех странах широко применяется метод вдавливания жестких стальных инденторов с плоским основанием в плоский образец стекла [37,38]. Метод позволяет измерять вязкость в интервале $10^{12} - 10^4$ П.

В методе вдавливания индентора определяется скорость погружения тела в размягчённое вещество под действием нагрузки, зависящая от вязкости

исследуемого вещества. Схема установки показана на рисунке 1.19.

Для расчёта вязкости по этому методу предложено уравнение:

$$\eta = m \cdot \frac{P \cdot g}{4 \cdot v \cdot \sqrt{S}}, \quad (1.5)$$

где η - вязкость,

P - масса нагрузки,

S - площадь основания индентора,

m - коэффициент, зависящий от формы индентора (для цилиндра 0.96);

v - стационарная скорость углубления индентора.

Для цилиндрического индентора диаметром 1 мм подстановкой физических постоянных получаем:

$$\eta = \frac{2.657 \cdot 10^6 \cdot P}{v}, \quad (1.6)$$

где η - вязкость, пуаз;

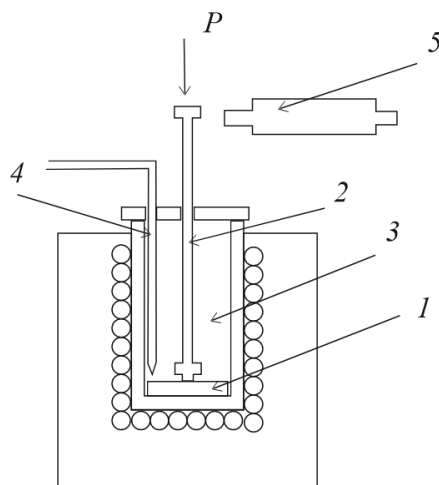
P - масса нагрузки, кг;

v - скорость, см/с.

Таким образом, нахождение вязкости при заданной температуре сводится к определению скорости погружения индентора в стекло.

Преимущество данного метода заключается в простоте подготовки образца для исследования, наиболее подходящего для исследования вязкости плоских стекол. Недостатком метода можно считать возможность «залипания» индентора на поверхности стекла при температурах выше 700 – 720 °С.

Практического применения классические устройства по определению вязкости в лабораториях предприятий мало используется. Это связано, в первую очередь, со сложностью подготовки исследуемого образца, длительностью проведения эксперимента, а главное, с различной формой стеклянного объекта, применяемого на производстве. Однако в литературных источниках найдены сведения об адаптации классических методов определения вязкости [39–41].



1 – испытуемый плоский образец; 2 – шток с индентором; 3 – трубчатая печь; 4 – термопара; 5 – фиксирующий микроскоп; P – приложенное усилие
Рисунок 1.19 – Схема установки для определения коэффициента динамической вязкости методом вдавливания индентора

Это касается разработки методов, где в качестве исследуемого образца применяется стандартный стеклянный объект (трубка, лист, волокно), применяемый на этом предприятии.

В [39] предложен способ адаптации определения вязкости стекла для изготовления изделий из стеклянных трубок. Отличительная сущность метода заключается в изменении и ускорении способа нагрева стеклянной трубки до рабочих температур. На рисунке 1.20. показана схема устройства.

Внутри индукционной печи 2 помещают исследуемый образец стекла в виде, используемой в производстве стеклянной трубки 3, зафиксированной в верхнем положении. Внутри трубки помещают ферромагнитный сердечник 1, который нагревается индукционным током. К нижней части трубки прилагается деформирующее (вытягивающее) усилие. Контроль температуры осуществляется при помощи термопары 4. Контроль перемещения осуществляется при помощи микроскопа 5.

Авторы [39] установили, что за счет использования индукционного нагрева образца в форме полый трубки при помощи помещаемого внутрь промежуточного нагревательного элемента из проводящего

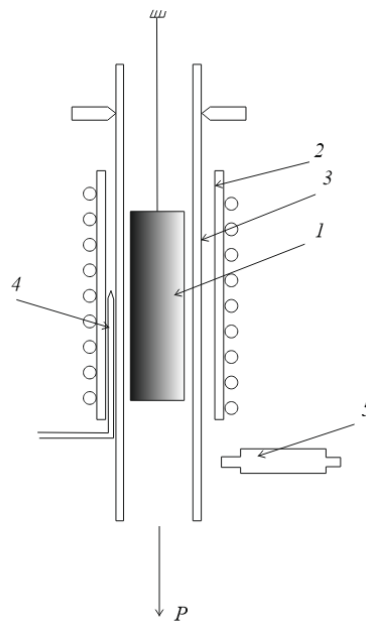
высокотемпературного материала и измерении скорости удлинения образца при стационарной температуре уменьшается длительность определения вязкости. Благодаря индукционному нагреву скорость подъема температуры между стационарными участками может достигать 10 °C/с или более. Увеличение достоверности получаемых данных температурной зависимости вязкости при заданных значениях температуры было достигнуто за счет использования образцов в форме полый трубки без предварительной механической и термической обработки.

Расчет значения вязкости может осуществляться с заменой площади сечения дрота, на площадь сечения трубки.

Данный способ определения вязкости адаптирован к условиям существующего производства акционерного общества «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина» и может быть рассмотрен, как адаптация метода определения вязкости по вытягиванию нити.

Преимущества данного метода заключаются, в первую очередь, большой скоростью нагрева образца стекла, обеспеченной индукционно нагретым ферритовым сердечником, что позволяет оперативно проводить проверку образцов стекла в заводской лаборатории. Недостатком метода можно считать узкую направленность оборудования для проверки вязкости тонкостенных трубок.

В работе [40] представлен способ определения вязкости стеклянного волокна, где в качестве источника нагрева небольшого объема стекла используется CO₂ лазер. Излучение 10,6 мкм легко поглощается большинством стекол, что позволяет сократить время измерения по сравнению с традиционными методами, при которых для нагрева и охлаждения образцов большого объема может потребоваться несколько часов. Это также позволяет измерять полный спектр составов стекол в широком диапазоне температур. Схематический принцип работы установки показан на рисунке 1.21.



1 – ферромагнитный сердечник; 2 – индукционная печь; 3 – образец стекла (трубка); 4 – термопара; 5 – фиксирующий микроскоп; P – приложенное усилие

Рисунок 1.20 – Схема установки для определения коэффициента динамической вязкости методом вытягивания трубки

Лазерный луч CO_2 толщиной 10,6 мкм расширяется, а затем фокусируется в пятно диаметром 100 мкм с помощью сферического зеркала. Когда вес волокна ниже нагретого объема меньше поверхностного натяжения, волокно вытягивается и образует шарик из-за поверхностного натяжения. Зеркало сканируется вверх от нижнего конца волокна до тех пор, пока поверхностное натяжение не станет меньше веса волокна ниже зоны нагрева, а оставшийся шарик сужается и взвешивается. Температура контролируется оптическим пирометром.

Основываясь на классическом подходе расчета вязкости, исследователи сделали вывод, что целое волокно нагревается в печи или дилатометре, динамическая вязкость может быть выражена формулой:

$$\eta = P \cdot L_1 \cdot d\tau / 3A \cdot dL_1, \quad (1.7)$$

где P - сила, обусловленная нагрузкой, приложенной к волокну;

L_1 - начальная длина волокна;

A - площадь поперечного сечения волокна;

dL_I/dt - скорость удлинения.

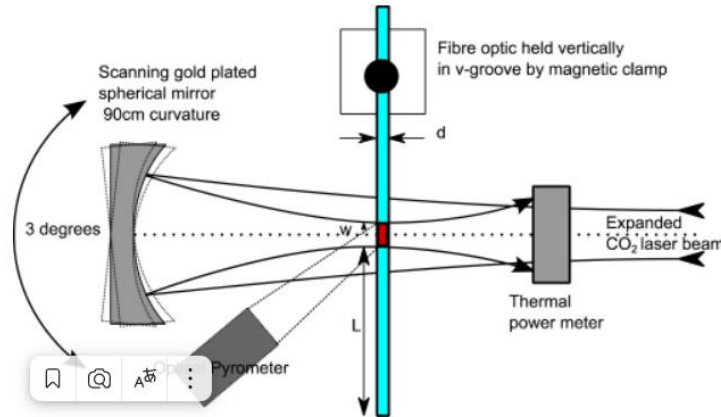


Рисунок 1.21 – Схематический принцип работы устройства для определения вязкости стеклянного волокна

В работе [41] авторами предложен способ расчета вязкости стекол по скорости вдавливания конического индентора в тонкие образцы толщиной 0,1 – 4 мм при непрерывном нагревании со скоростью от до 10 °C/мин и нагрузках на индентор от 300 до 20 г. При этом на пластинках толщиной 0.13–0.18 мм возможны измерения вязкости в пределах 10^{12} – 10^7 П с погрешностью не более ± 2 %. Однако, как замечают авторы, предложенный вариант метода требует предварительного градуирования по эталонному стеклу, т. е. является относительным. Исследования показали, что метод измерения вязкости стекол по скорости вдавливания конического индентора в образцы в виде тонких пластинок и покрытий дает удовлетворительные результаты и позволяет охватить интервал 10^{12} – 10^7 П. При толщине образцов менее 1 мм коэффициенты в формуле для расчета вязкости зависят от начальной толщины образца, что требует отдельной калибровки индентора для каждого из узких интервалов толщин. Эти интервалы составляют ± 0.05 мм при средней толщине 0,15 мм и $\pm 0,15$ мм при средней толщине 0.55 мм. Применение тонких образцов дает возможность повысить верхний температурный предел при измерении

вязкости легко кристаллизующихся стекол.

Все рассмотренные методы определения вязкости основаны на принципах измерения деформационных свойств стекла при фиксированных температурах. Получаемые результаты расчета являются абсолютными значениями и соответствуют тому или иному конкретному функциональному значению.

$$\eta = f(T), \quad (1.8)$$

Однако, для корректировки режима моллирования плоского стекла одного значения недостаточно. Для определения правильности изменения температурного режима необходимо провести несколько экспериментальных исследований.

Значительную часть исследований в определении вязкости стекол занимают теоретические расчеты построения температурно-вязкостных зависимостей, основанных на свойствах входящих в него оксидов [42,43,44,45]. Сложность теоретических расчетов вязкостных характеристик, определяющих необходимые зависимости, приводит к необходимости создания расчетных эмпирических зависимостей вязкости от состава стекла.

Для рассматриваемого нами типа стекол и температурного интервала наиболее подходящим является метод Охотина [31], суть которого заключается в расчете температуры, соответствующей данной вязкости стекла по эмпирической формуле:

$$T_{\eta} = K_1 [Na_2O] + K_2 [CaO + MgO] + K_3 [Al_2O_3] + K, \quad (1.9)$$

где T_{η} – температура, отвечающая заданному уровню вязкости;

K_1, K_2, K_3, K – константы, значения которых соответствуют выборочному уровню вязкости

Концентрацию оксидов в формуле выражается в массовых процентах. Определив химический состав стекла, метод Охотина позволяет рассчитать вязкость стекла в диапазоне $10^2 - 10^{14}$ П. Однако этот метод применим только к стеклам, содержащим в своем составе следующие оксиды SiO_2, Na_2O, CaO, MgO

и Al_2O_3 в пределах, мас. %: $Na_2O = 12 - 16$; $CaO = 5 - 12$; $MgO = 0 - 5$; $Al_2O_3 = 0 - 5$.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что оперативное определение вязкости стекла является важным фактором в оптимизации процесса моллирования стекла.

В работе [46] представлен расчет вязкости пятикомпонентных борсиликатных стекол, основанный на построении регрессионной зависимости. При этом сравнивались экспериментальные и расчетные параметры.

В результате исследования получена полиномиальная зависимость, учитывающая при расчете вязкости как состав стекла, так и температурную составляющую в диапазоне $560 - 630$ °C.

$$Lg\eta = (35,29 - 0,039t)x_1 + (27,757 - 0,027t)x_2 + (39,428 - 0,048t)x_3 + (31,395 - 0,032t)x_4 + (29793 - 0,030t)x_5 - 0,814x_1x_2 + 1,431x_1x_5 + 1,442x_2x_3 - 1,861x_2x_5, \quad (1.10)$$

где $(x_1 - x_5)$ – концентрация оксидов $Na_2O - CaO - B_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$, мол.%;
 t – температура °C.

Расчет проводился для диапазона: $Na_2O - 10-20$; $CaO - 5-15$; $B_2O_3 - 10-20$; $Al_2O_3 - 0-10$; $SiO_2 - 65-75$ мол. %.

Разработка подобной математической модели позволяет осуществлять технологические расчеты свойств стекла в области стеклования материала.

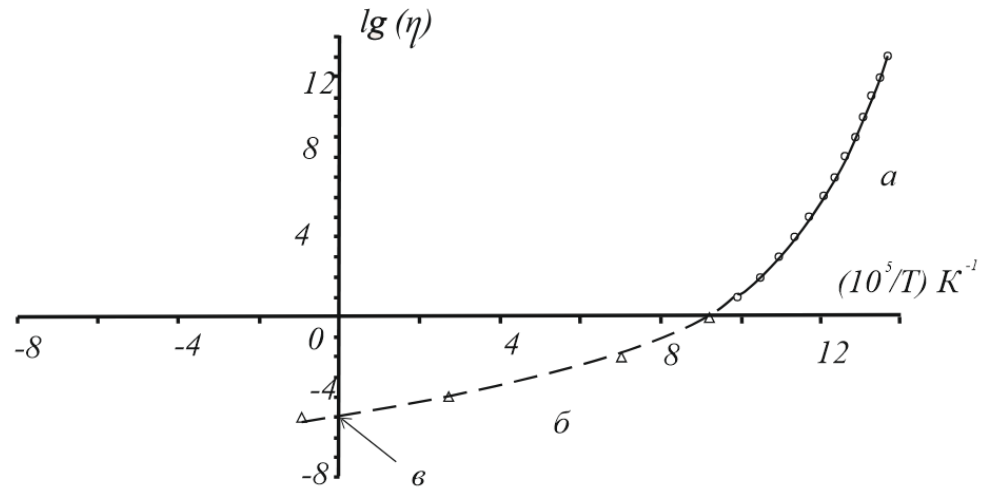
В работе [47] представлен расчет предэкспоненциального множителя в формуле расчета вязкости:

$$D = \eta_o \cdot \exp(E_\eta/RT), \quad (1.11)$$

где E_η – свободная энергия активации вязкого течения;

η_o – предэкспоненциальный множитель, который определяется путем экстраполяции кривой $\lg\eta - (1/T)$ к $1/T \rightarrow 0$.

Полученная экспериментальная зависимость, показанная на рисунке 1.22, была экстраполирована до пересечения с осью Y с применением полинома Лагранжа.



a – экспериментальная зависимость; *б* – расчетная зависимость по методу Лагранжа; *в* – значение логарифма предэкспоненциального множителя

Рисунок 1.22 – Температурная зависимость вязкости в координатах $\lg \eta - 1/T$

Логарифмическое значение предэкспоненты в уравнении вязкости :

$$\lg \eta_0 = -4,766. \quad (1.12)$$

Подобные теоретические расчеты допустимы при изотропности свойств материала, что наблюдается в большинстве случаев при моллировании плоских стекол.

1.4 Анализ современных способов механического шлифования стекла

Современные исследования в области механического шлифования стекла сводятся к двум направлениям:

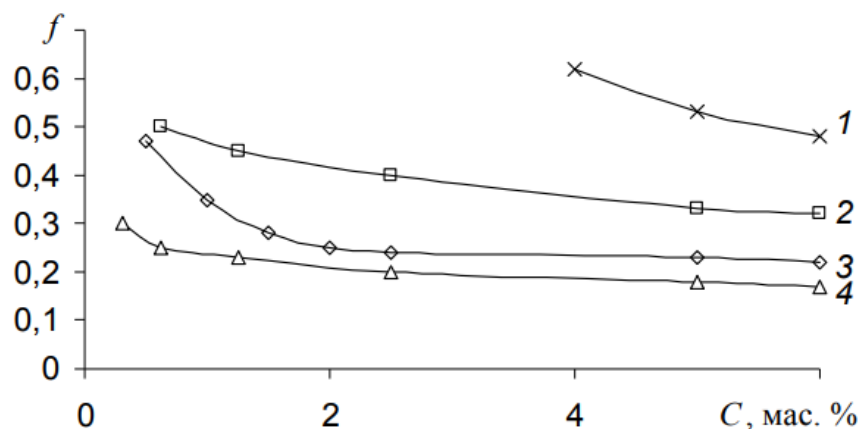
- разработка и исследование новых шлифовальных материалов, СОЖ и инструментов для шлифования;
- исследование механических процессов и разработка математических моделей, описывающих процесс шлифования.

Значительная часть публикаций по этой теме представлена в виде патентов без объяснения научной новизны предложенного решения [48,49,50,51].

Механическая обработка стекла является сложным процессом, который

включает в себя ряд физических, химических и физико-механических явлений, связанных как с охлаждением обрабатываемой поверхности, так и играющую роль смазочного материала и диспергирования абразива на поверхности стекла.

В работе [52] рассмотрено влияние смазочно-охлаждающих жидкостей СОЖ на процесс шлифования стекла, в частности исследование механизма влияния азотсодержащих полимерных соединений на примере водорастворимого сополимера акриламида с акрилатами аммония и натрия (САА) на эффективность процесса шлифования стекла. Была дана оценка смазывающей способности растворов и исследованы зависимости коэффициентов трения от концентрации сополимеров. Было доказано снижение коэффициента трения по сравнению с использованием других сополимерных композиций даже при малых концентрациях САА рисунок 1.23.



1 – КЛ; 2 – ПВС; 3 – ПЭПА; 4 – САА

Рисунок 1.23 – Зависимость коэффициента трения от концентрации растворов СОЖ:

Для решения этой же задачи в работе [53] предложена сополимерная водная композиция следующего состава (мас. %)

полиэтиленполиамин – 0,05-0,5;

фосфорная кислота – 0,025-0,25;

никель сернокислый – 0,0025-0,025;

этиленгликоль – 0,025-0,25;

кальцинированная сода (карбонат натрия) – 0,1-1,0;

триэтаноламин – 0,05-0,5;

вода остальное.

На основе проведенных исследований авторы утверждают, что предложенный состав имеет ряд преимуществ:

- обеспечивает повышение производительности процесса шлифования на 50-75 %;
- обеспечивает возможность высокоэффективного шлифования различных материалов, например, всех типов стекол, сапфира, кремния и других полупроводниковых материалов, керамики, сталей и пьезокварца;
- обеспечивает повышение качества обработки за счет уменьшения глубины нарушенного слоя;
- является экологически чистым и безвредным для обслуживающего персонала продуктом;
- не вызывает коррозии обрабатываемых деталей и деталей и узлов шлифовального оборудования;
- обладает антисептическими свойствами, препятствует образованию грибков и биологическому разложению СОЖ.

Определяющую роль в шлифовании стекла имеют контактные параметры инструмента и обрабатываемой стеклянной поверхности. Значительная часть работ посвящена исследованию процессов, проходящих в зоне этого контакта.

Работа [54] посвящена исследованию шлифования малощелочных стеклянных панелей для ИТ-устройств. Было исследовано влияние условий шлифования, таких как скорость подачи и скорость кромкошлифования кромок на шероховатость и сколы обрабатываемой поверхности. При шлифовании кромок стекла, не содержащего щелочи, слабые механические свойства стекла приводят к образованию крупных сколов из-за возникновения растягивающего напряжения в конце операции измельчения. Результаты этого исследования показывают, что характеристики измельчения стекла, не содержащего щелочей, получены и соответствуют промышленным требованиям.

Были выявлены режимы обработки кромок стеклянных пластин в пакетах по 10 шт, а также механизмы образования микросколов на обрабатываемых краях стекла. Так же были предложены методы по улучшению параметров технологического шлифования торцовых поверхностей тонких пластин (защитных экранов) для ИТ-устройств.

В работе [55] рассмотрен механизм образования дефектов при шлифовании в стекле марки ВК-7. На рисунке 1.24. показана схема образования трещин при шлифовании стекла.



Рисунок 1.24 – Схема образования трещин при обработке жальным индентором

Представлены математические расчеты о влиянии технологических параметров обработки стекла, а также построены математические модели поведения материала при различных режимах шлифования. Основываясь на геометрии инструмента:

$$a_i = h_i \cdot \tan(\gamma/2), \quad (1.13)$$

Была предложена формула расчета глубины образуемой трещины в шлифуемой зоне:

$$C_{mi} = \lambda \cdot h_i^{4/3}, \quad (1.14)$$

$$\lambda = 0,206 ((E^{0,5} \cdot H_s^{0,5}) / (K_c \cdot B))^{2/3} \cdot (\cot(\gamma/2))^{4/9} \cdot (\tan((\gamma/2)))^{4/3}, \quad (1.15)$$

где E – модуль Юнга;

H_s – твердость стекла при царапании;

K_c – коэффициент вязкостного разрушения;

B – коэффициент упругого восстановления материала.

Предложенная методика позволяет оценить свойства материала перед началом его обработки, тем самым снизив процент образования брака при обработке.

В работе [56] рассмотрены методы плоского шлифования стекла, целью которого является совершенствование технологического процесса плоского шлифования стекла. Впервые был рассмотрен эффект пластичного поведения стекла при шлифовании.

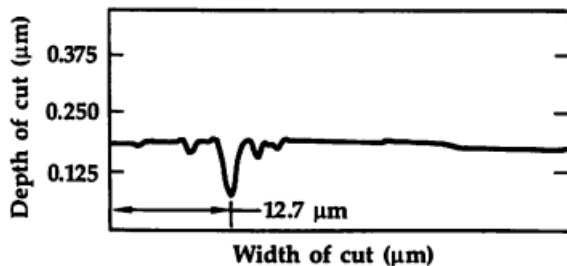
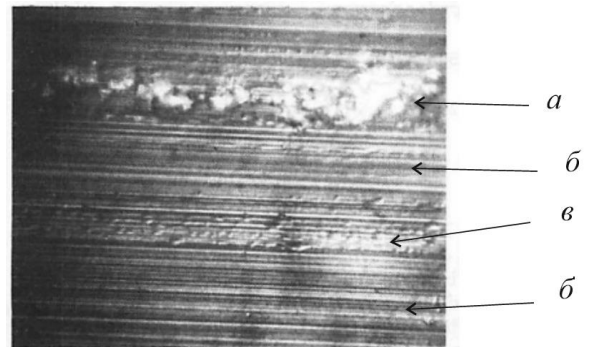


Рисунок 1.25 – Профиль глубины одной царапины, оставленной режущим кругом



$a, в$ – хрупкая деформация; $б$ – пластичная деформация
Рисунок 1.26 – Микрофотография деформаций плоского шлифа стекла

Было обнаружено, что поверхность обрабатываемого стекла не совпадает с первоначальной плоскостью, что доказывает наличие пластической деформации при шлифовании поверхности стекла. Было отмечено, что различные типы деформаций в стекле определяются не только качеством изготовления шлифуемого инструмента, но также и поверхностными свойствами стекла во многом обуславливаемые предварительной термической обработкой стекла.

В работе [57] так же представлено математическое моделирование процесса шлифования стекла, а также определение параметров шлифования при использовании шлифовального порошка различной фракции.

Были установлены различные коэффициенты трения шлифовальных порошков для разных стадий шлифования

Таблица 1.2 – Значения коэффициента трения

Суспензия микропорошка			Шлифовальный круг	
M40	M28	M10	смоляной	пенополиуретановый
0,20–0,22	0,23–0,25	0,27–0,29	0,5–0,6	1,1–1,2

В результате выполненной работы было проведено математическое моделирование процесса шлифования стекла в условиях свободной притирки поверхности с определением критериев эффективного формообразования поверхности детали. Так же было установлено значение коэффициентов трения между поверхностью стекла и инструментом в зависимости от типа нанесенной суспензии. Что позволяет определить эффективную притирающую поверхность и снизить эффект «сорванного края» при шлифовании.

В патентах [58,59] представлены конструкции шлифовальных инструментов, способствующих совершенствованию высокоскоростной обработке хрупких неметаллических материалов. Суть усовершенствования заключается в преодолении резонансной частоты при шлифовании поверхности, а также наличии «упругого хода» у обрабатывающей головки инструмента.

В работе [60] были исследованы динамические характеристики процесса микрошлифования хрупких неметаллических материалов.

Было установлено увеличение импульса силы при микрошлифовании с ростом глубины внедрения инструмента в деталь от скорости обработки материала.

В работе [60] также была установлена математическая зависимость импульса силы от скорости резания материала, выражаемая формулой:

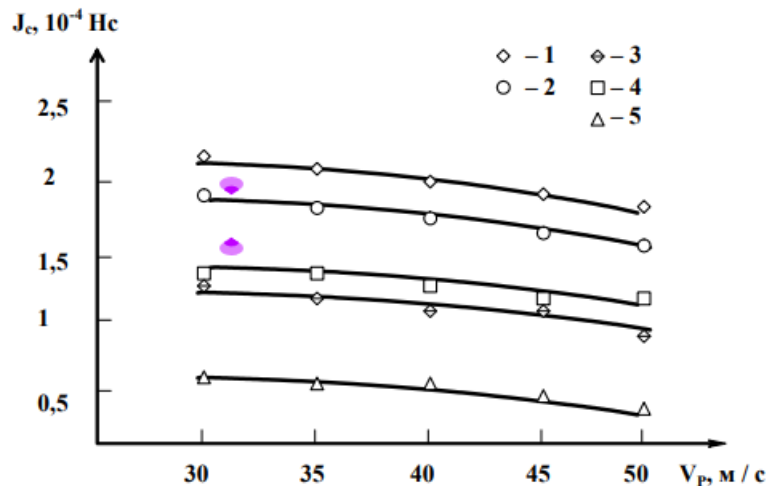
$$J_c = 54.7174 \cdot V_p^{-3.147} \cdot t^{1.4575} \cdot e^{1.3122} \cdot \rho^{0.2054} \quad (1.16)$$

где V_p – скорость резания материала;

t – глубина внедрения инструмента в материал;

e – угол при вершине инструмента;

ρ – радиус скругления инструмента.



1 – поликор; 2 – керамика ЦМ; 3 – феррит 1000НТ1; 4 – феррит 2000МТ1;
5 – стекло

Рисунок 1.27 – Зависимости импульса силы дискретного микрорезания от скорости микрорезания при разрушении хрупких материалов ($t=30$ мкм)

Анализ источников показал, что качество обработки хрупкого материала может характеризоваться импульсом силы обработки, зависящим от геометрии и скорости обработки материала.

В работе [61] приведен расчет размеров абразивного зерна, классифицированного по ГОСТ 52381-2005, позволяющий систематизировать формирование шлифующей поверхности абразивного инструмента.

Выводы по Главе 1.

Проведенный обзор опубликованных исследований в области пластической деформации стекла и механической обработки поверхности выявил основные тенденции развития. В первую очередь к ним относятся:

- математическое моделирование процессов, проходящих при моллировании и шлифовании стекла;

- исследование влияния материалов и инструментов на процессы;
- исследование температурных и механических факторов на моллирование стекла;

Особенностью практически всех исследований является анализ статических процессов и зависимостей, не позволяющих создать динамическую картину поведения материала при его обработке.

В литературных источниках найдено мало практических исследований поведения стекла в диапазоне вязкости 10^6 – 10^8 П, характеризующего физические особенности перехода стекла из пластичного в жидкое состояние для формования изделий сложной геометрии.

При исследовании процесса моллирования рассматриваются частные случаи изготовления того или иного изделия, без общего анализа деформации плоского стеклянного листа. Математические модели оперируют абсолютными значениями параметров вязкости, что не всегда является удобным при корректировке технологических параметров процесса моллирования.

Исследования в области шлифования стекла сконцентрированы на обработке плоских поверхностей или же фигур вращения. Отсутствуют методы оценки и способы шлифования несимметричных стеклянных поверхностей.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ ПЛОСКОГО СТЕКЛА ПРИ МОЛЛИРОВАНИИ В ВАКУУМНУЮ ФОРМУ С ЗАКРЕПЛЕННЫМ КРАЕМ

Исследование проводили для выявления закономерностей, возникающих при деформации листового стекла в процессе моллирования.

2.1 Разработка метода исследования вязкости плоских стекол

В качестве объекта исследования выбрано листовое стекло Саратовского стеклозавода, полученное по технологии флоат-формования, толщиной 6 мм и соответствующее ГОСТ 111-2014 [8], сертификат которого показан в приложении А на рисунке А.1.

Химический состав стекла, определяли методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии, основанной на сравнении характеристического рентгеновского излучения анализируемого образца и стандартов известного состава. Анализ проводили на рентгеновском энергодисперсионном микроанализаторе Oxford Instruments INCAx-act, Model 51-ADD0007 и автоматической напылительной установке Quorum Technologies Ltd Q150RE. Результаты анализа стекла приведены в таблице 1.1.

Выбор материала для исследования был обусловлен:

- доступностью листового стекла как материала для дальнейшей термической обработки;
- стабильным набором физических и химических свойств материала, обусловленных ГОСТ 111-2014 [8];
- недостаточным исследованием свойств формования материала, особенно на границе T_f – пластического и жидкого состояния материала.

Таблица 2.1 – Результаты химического анализа листового стекла

Химический состав и мас. %										
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Всего
14,22	3,96	0,69	72,52	0,2	0,03	0,12	8,14	0,07	0,05	100

В качестве предмета исследования на данном этапе выбрано изменение геометрических параметров листового стекла в процессе моллирования в вакуумную форму с фиксированным краем [62,63]. Выбор предмета исследования был обусловлен необходимостью определения поведения листового стекла при формировании его при температурах на границе пластическое состояние – жидкость (T_f), а также для определения технологических параметров формования.

На данном этапе исследовали закономерности поведения материала при вакуумном формировании, а также зависимости деформационных свойств плоского стекла от технологических параметров моллирования.

В качестве вспомогательного материала для исследования выбрана формовочная масса состава:

- гипс марки ГВВС-16 – 60 мас. %;
- β -кристобалит марки SIKRON SF6000 – 40 мас. %.

Сертификация материалов показана в приложении А на рисунок А.2 и в таблицах А.1 – А.3.

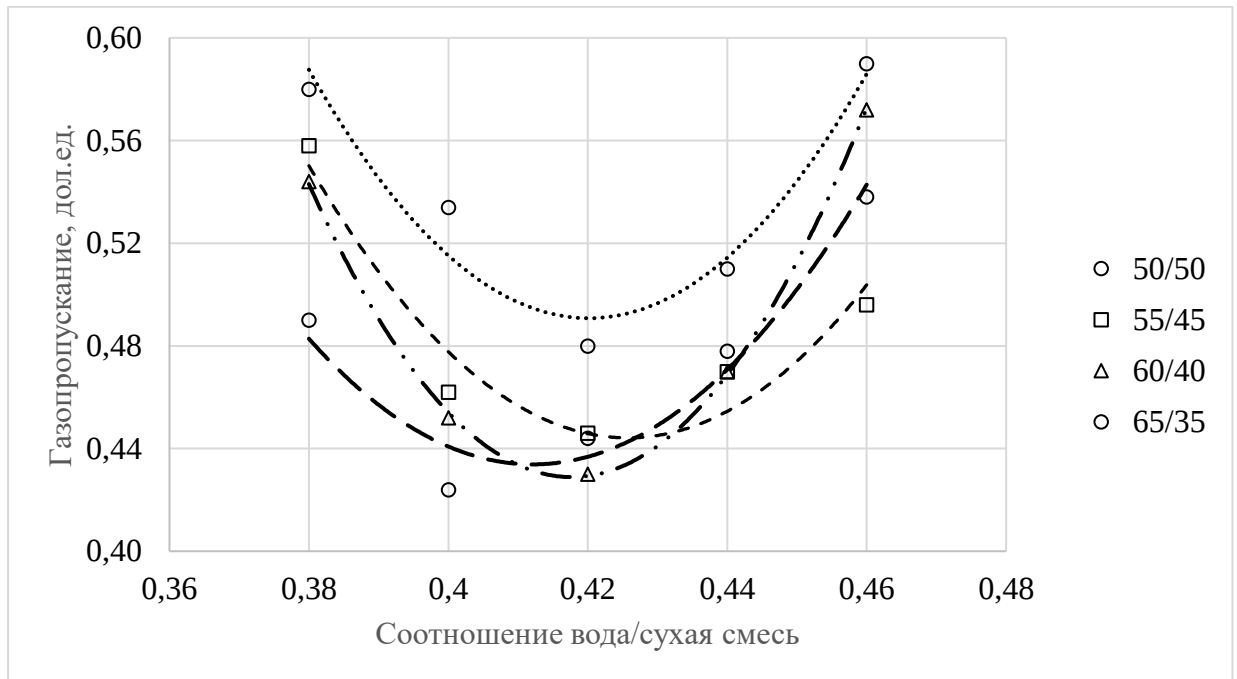
Выбор материала для изготовления формы был обусловлен:

- доступностью формовочного материала;
- технологичностью изготовления форм для малосерийного производства;
- термостойкостью и механической прочностью при температуре моллирования;
- способностью формовочной массы к газопроницанию.

Гипсо-кристобаллитовую массу использовали при создании газопроницаемых форм для проведения исследования процесса вакуумного

моллирования. Использование β -кристобалита в качестве наполнителя обусловлено максимальным компенсирующим эффектом при усадке гипса в диапазоне 80 – 300 °С.

Для определения соотношения сухая масса – вода при формировании исследовали относительную газопроницаемость формы. Результаты исследования показаны на рисунке 2.1.



a – 55/45; *б* – 60/40; *в* – 65/35; *г* – 50/50 мас. %

Рисунок 2.1 – Зависимость относительного газопроницаемости смеси после прокалки при температуре 850 °С от соотношения вода/масса (В/М) для различных концентраций гипс/β-кристобаллит

Режимы прожига массы изложены в приложении Б в таблице Б.1.

Результаты исследования, представленные на рисунке 2.1 показали, что газопроницаемость формы, отлитой в массовом соотношении H_2O /сухая смесь от 0,40/0,60 до 0,45/0,55 меняется незначительно. В массовом же соотношении менее 0,40/0,60 литейные свойства формомассы значительно ухудшаются, а в соотношении более 0,45/0,55 снижаются прочностные свойства формы. В качестве материала для изготовления форм была выбрана смесь в соотношении гипс/β-кристобаллит–55/45 и H_2O /сухая смесь–0,4/0,6. Экспериментальные данные представлены в приложении Б в таблице Б.2.

Определение относительной зависимости газопроницаемости формуемого материала осуществляли при помощи прибора для определения газопроницаемости песков и влажных, сухих или отвержденных образцов формовочных и стержневых смесей модели 04315. Характеристики прибора изложены в приложении А на рисунке А.3 и в таблице А.5.

Для проведения эксперимента использовали электрическую камерную печь СНОЛ 120/12-И2 с рабочей камерой 400х400х800 мм, с боковым и нижним нагревом, максимальной температурой 1200 °С и термопарой ТХА-3, терморегулятором «Варта 703-3», модернизированной для установки в печь с вакуумной формой. Погрешность измерения температуры составляла $\pm 1^\circ\text{C}$.

Для достоверности эксперимента определили температурный градиент в печи. Результаты показаны на рисунке 2.2. Экспериментальные данные представлены в приложении Б в таблице Б.3.

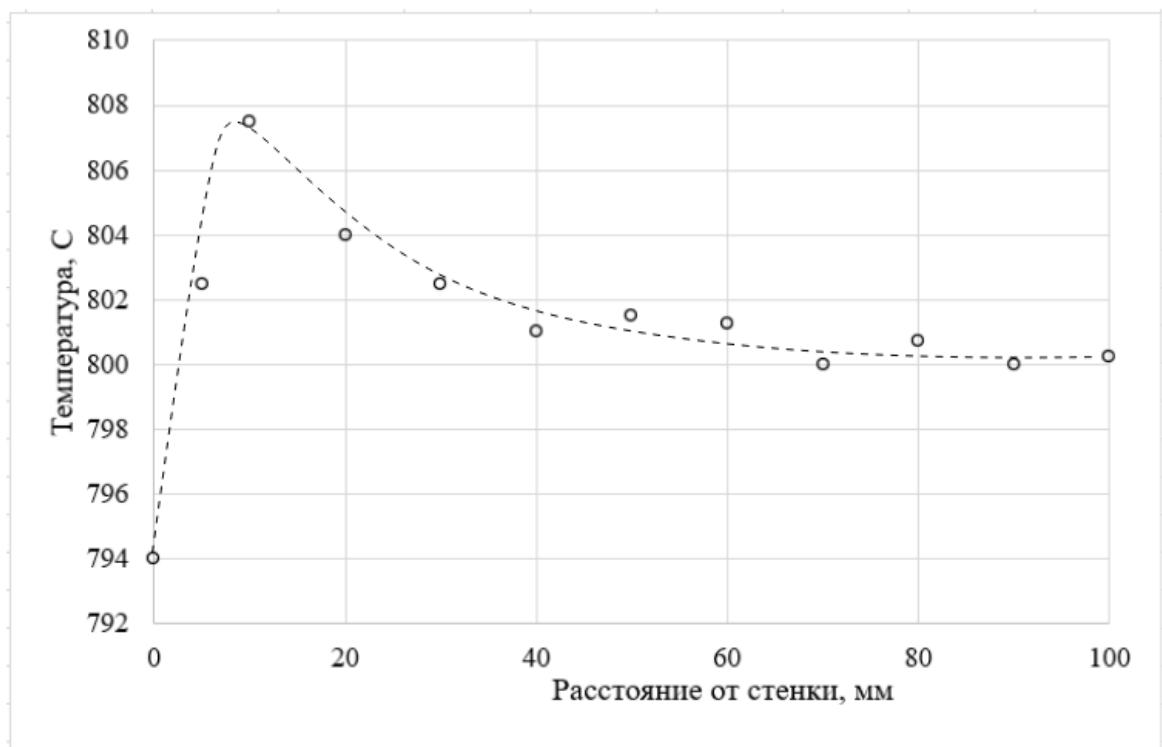


Рисунок 2.2 – Температурный градиент печи СНОЛ 120/12-И2 при температуре 800 °С

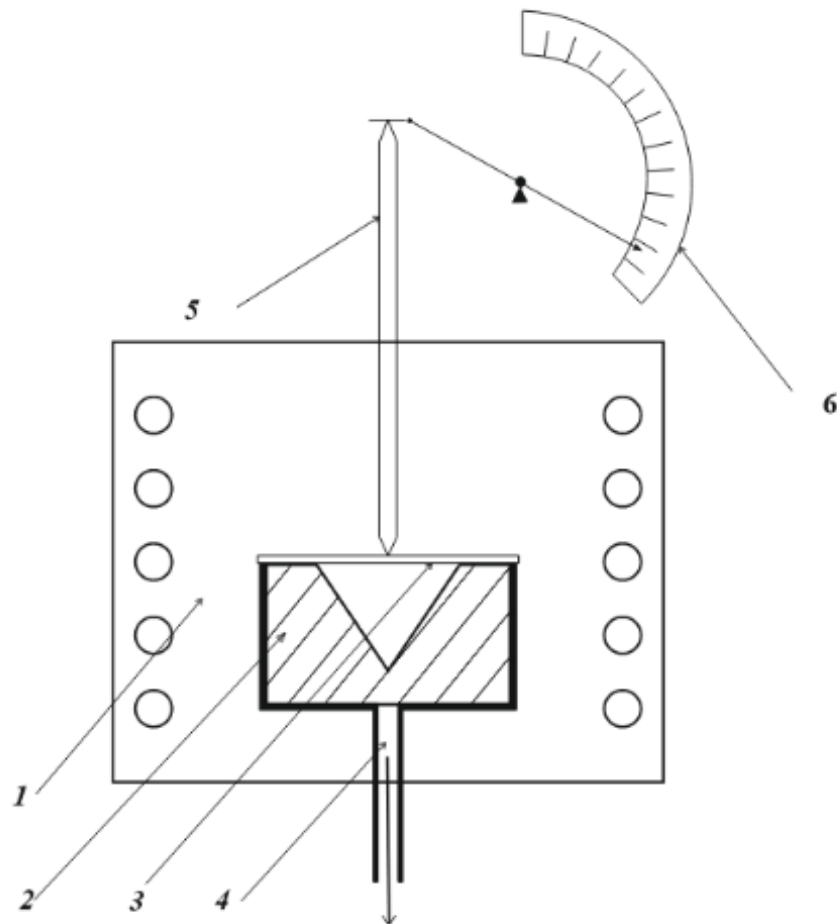
Для создания разряжения в форме использовался вакуумный насос 2TW-3CV (VP270SG)

- производительностью 198 л/мин;
- остаточной разряжение 0,3Па;

Контролирующий вакуумный манометр Росма ТВ серии 321:

- Рабочая температура: $-60 \dots +200^{\circ}\text{C}$;
- Диапазон показаний давления: 0,1...0 МПа;
- Класс точности: 1,0.

Для проведения исследования была разработана установка, схема которой показана на рисунке 2.3.



- 1– камерная печь; 2–вакуумная формующая камера; 3– листовое стекло; 4– вакуумирующая система; 5 –щуп, фиксирующий изменение рельефа;
6 – микрометр

Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки

Методика эксперимента на данном этапе исследования заключалась в следующем [64].

В камерную печь 1 установили вакуумную форму, состоящую из металлической цилиндрической оболочки, газопроницаемого формующего вкладыша 2 и вакуумной трубки, выходящей за пределы печи. Наружные геометрические размеры формы составляют: $D - 150$ мм, $H - 120$ мм. Форма установлена на высоте 100 мм от пода и 120 мм от стенки печи, что соответствует градиенту температур в зоне эксперимента ± 1 °С, как показано на рисунке 2.2.

На форму поместили образец исследуемого стекла 3 диаметром 160 мм и толщиной 6 мм так, чтобы края стекла перекрывали плоскость, тем самым обеспечивая герметичность формы.

Через отверстие в своде печи в центр формы установили кварцевый щуп 5, один конец которого упирается в плоскость стекла, а второй в датчик микрометра 6, фиксирует вертикальное перемещение щупа.

Исследование проводили при следующих условиях:

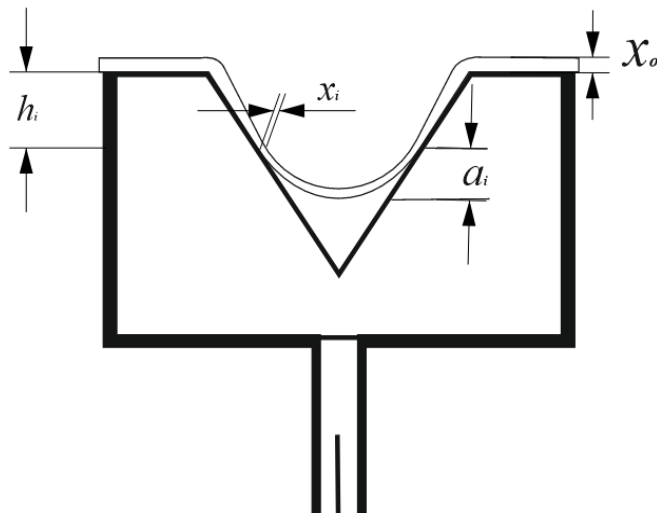
- листовое стекло состава (смотри таблица 2.1), толщиной 6 мм;
- температура близкая к $T_f - 800$ °С;
- остаточное разряжение в форме 0,05 МПа.
- формообразующий материал для вакуумной формы – гипсо-кристобалитовая смесь с коэффициентом относительного газопропускания 0,47.

Измеряемые геометрические параметры моллируемого в форму стекла представлены на рисунке 2.4.

Для определения закономерностей деформации листового стекла в качестве исследуемых объемов форм были выбраны:

- полусфера диаметром 100 мм;
- цилиндр диаметром 100 мм и высотой 100 мм;
- конус диаметром при основании 100 мм и углом при вершине 15°, 30°,

45°, 60°, 90°.



Геометрические размеры: x_o – исходная толщина стекла, мм; h_i – глубина замера, мм; x_i – толщина стекла на глубине h_i , мм; a_i – высота провиса на глубине h_i , мм

Рисунок 2.4 – Замеряемые параметры моллированного стекла

2.2 Исследование влияния геометрии формующего элемента на процесс моллирования плоского стекла в вакуумную форму с закрепленным краем

Печь с подготовленной экспериментальной установкой, показанной на рисунке 2.3. нагрели до 600 °С со скоростью 10 °С/мин с последующей выдержкой на этой температуре в течении 30 мин. Далее форму с образцом стекла нагревали до 800 °С в течении 6 мин. При достижении заданной температуры внутри формы было создано остаточное разряжение 0,05 МПа. Под действием атмосферного давления плоскость стекла распределилась по поверхности формы. После заполнения формы, зафиксированного измерительным датчиком, печь была охлаждена до комнатной температуры, образец стекла извлекли из формы и провели замеры изменения толщины.

Особенности проведения эксперимента [64]:

– контрольная термопара ТХА-3 (без чехла) была установлена внутри кварцевого щупа-трубки на расстоянии 3 мм от поверхности образца, что

обеспечивало максимально точный замер температуры образца;

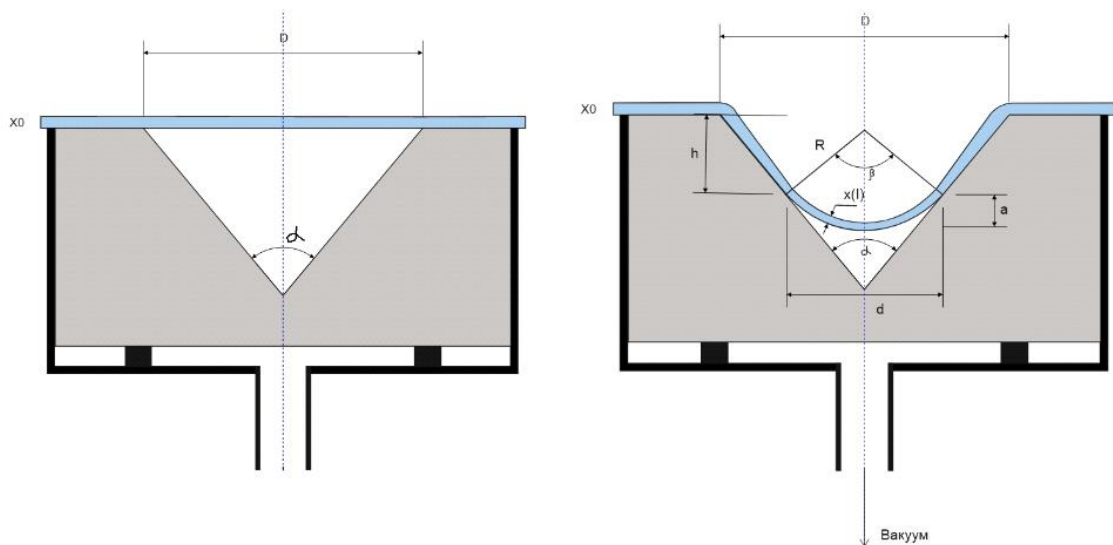
– разность температур образца стекла и внутренней поверхности формы составила 60 – 65 °С;

– на этапе прогрева стекла от 600 до 800 °С был зафиксирован провис стекла 3.5 – 5 мм. Столь малый провис при температурах, близких к T_f , обусловлен герметичностью формы;

– в качестве образца использовали листовое стекло, изготовленное флоат-способом, толщиной 6 мм. Флоат сторона обращена вниз;

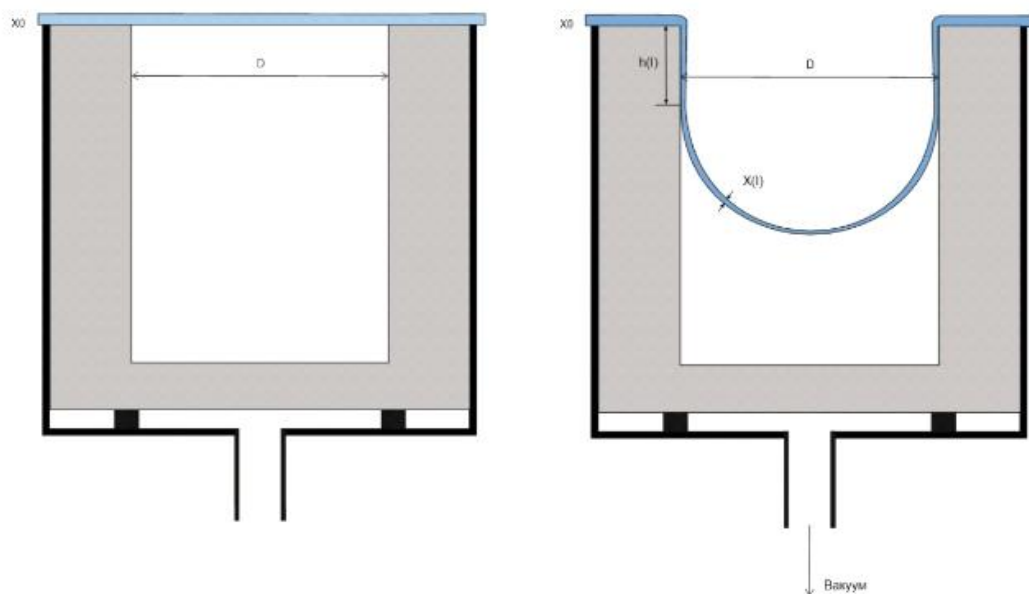
– после заполнения формы был проведен отжиг стекла.

Схема процесса заполнения форм представлена на рисунках 2.5–2.7. Средние результаты замеров толщины моллированных стекол для различных типов форм показаны в таблицах 2.2 – 2.4. Экспериментальные данные представлены в приложении Б в таблицах Б.4–Б.6.



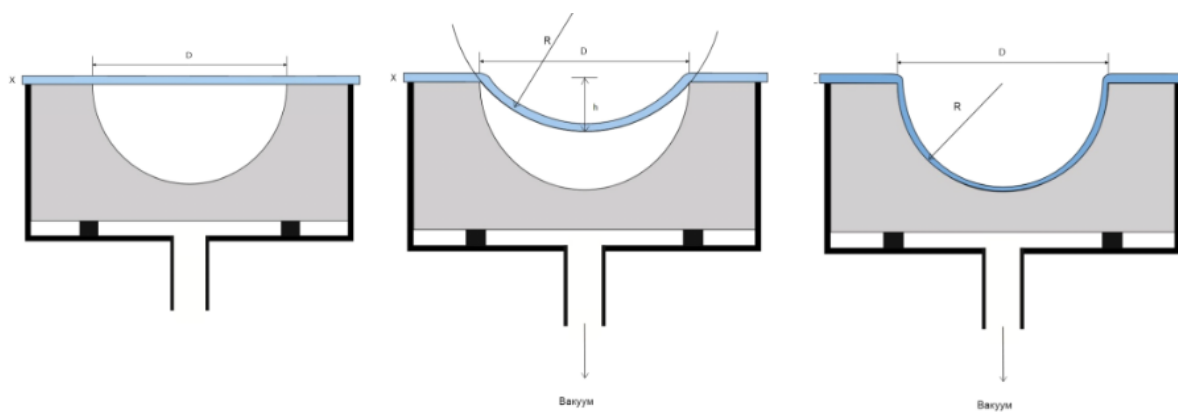
Геометрические размеры: D – диаметр формы; α – угол при вершине формы; x_0 – толщина исходного образца стекла; x_i – толщина стекла «свободного провиса» на высоте h ; d – диаметр сегмента свободного провиса; a – высота сегмента; R – радиус сегмента; β – угол сегмента «свободного провиса»

Рисунок 2.5 – Схема процесса заполнения конусной формы



Геометрические размеры: D – диаметр формы; x_0 – толщина исходного образца стекла; x_i – толщина стекла «свободного провиса» на высоте h_i ;

Рисунок 2.6 – Схема процесса заполнения цилиндрической формы



Геометрические размеры: D – диаметр формы; x_0 – толщина исходного образца стекла; R – радиус провиса стекла;

Рисунок 2.7 – Визуализация процесса заполнения полусферической формы

Таблица 2.2 – Средние результаты замеров толщины стекол моллированных в конусную форму

Угол конуса при вершине					
45°		60°		90°	
высота сечения h, мм	толщина стекла x _i , мм	высота сечения h, мм	толщина стекла x _i , мм	высота сечения h, мм	толщина стекла x _i , мм
0	6	0	6	0	6
0	4,15	0	4,50	0	5,12
-12	3,60	-9	4,11	-5	4,93
-24	3,08	-17	3,72	-10	4,72
-36	2,59	-26	3,33	-15	4,50
-48	2,13	-35	2,94	-20	4,27
-60	1,71	-43	2,55	-25	4,01
-72	1,32	-52	2,16	-30	3,73
-85	0,98	-61	1,77	-35	3,42
-97	0,67	-69	1,38	-40	3,07
-109	0,42	-78	1,01	-45	2,65
-121	0,23	-87	0,67	-50	2,20

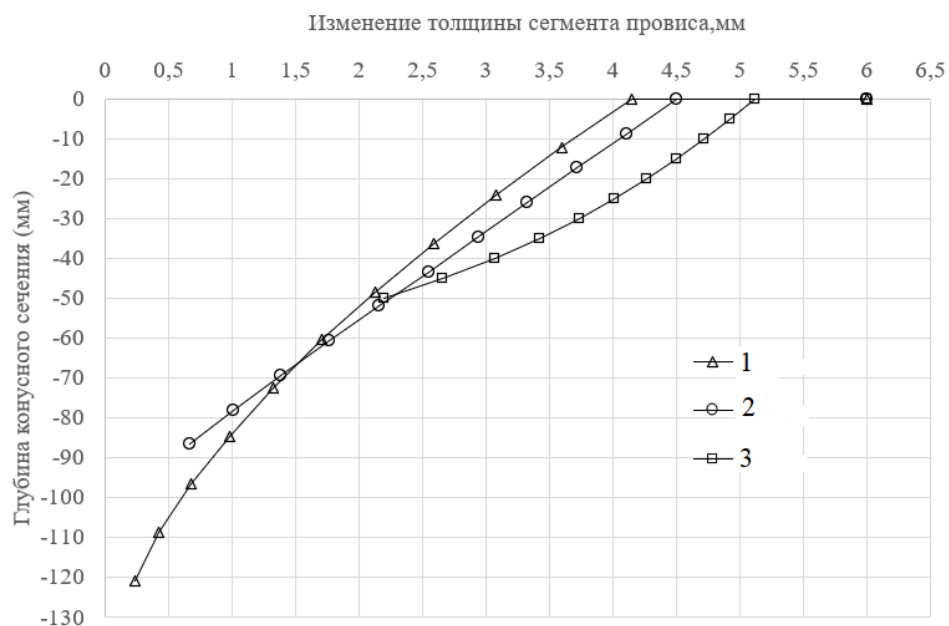
Таблица 2.3 – Средние результаты замеров толщины стекол моллированных в цилиндрическую форму диаметром 100 мм

Глубина сечения h (мм)	Толщина стекла	
	мм	%
0	6,00	100,00
0	3,00	50,00
-10	2,50	41,67
-20	2,14	35,71
-30	1,88	31,25
-40	1,67	27,78
-50	1,50	25,00
-60	1,36	22,73
-70	1,25	20,83
-80	1,15	19,23
-90	1,07	17,86
-100	1,00	16,67

Таблица 2.4 – Средние результаты замеров толщины стекол моллированных в полусферическую форму диаметром 100 мм

Глубина прогиба, h_i мм	Изменение толщины стекла, x_i	
	мм	%
-0,001	6,00	100,00
-5	5,94	99,01
-10	5,77	96,15
-15	5,50	91,74
-20	5,17	86,21
-25	4,80	80,00
-30	4,41	73,53
-35	4,03	67,11
-40	3,66	60,98
-45	3,31	55,25
-50	3,00	50,00

Для визуализации и анализа изменения толщины стекла в процессе моллирования результаты были представлены в виде графиков, представленных на рисунках 2.8–2.10.



Угол при вершине: 1 – 45°; 2 – 60°; 3 – 90°

Рисунок 2.8 – Зависимость изменения толщины моллируемого стекла в конусную форму от глубины прогиба

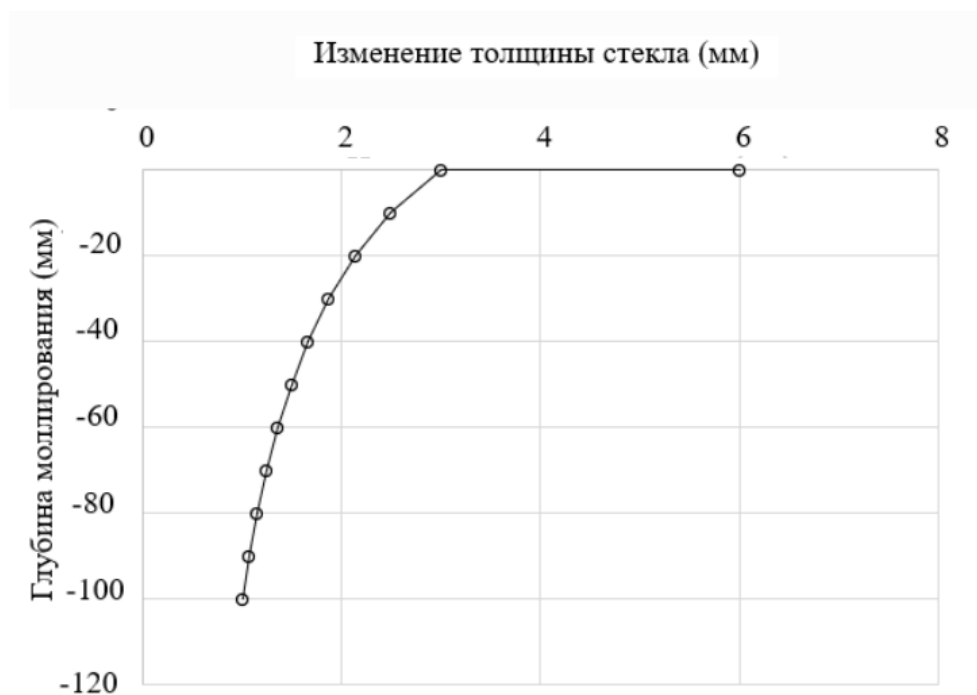


Рисунок 2.9 – Зависимость изменения толщины моллируемого стекла в цилиндрическую форму диаметром 100 мм

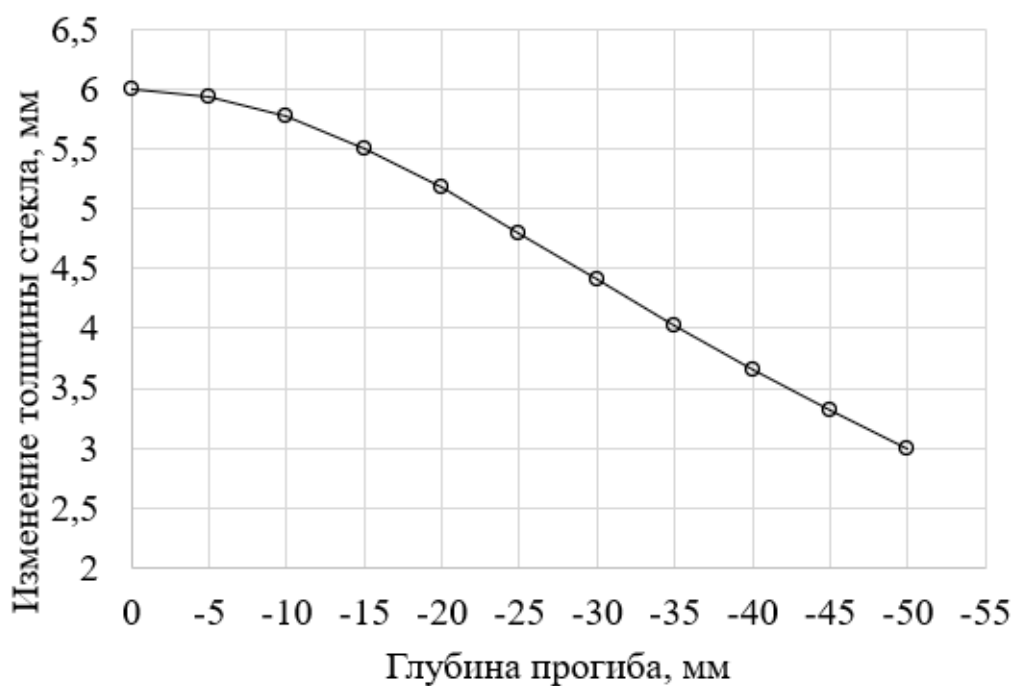


Рисунок 2.10 – Зависимость изменения толщины моллируемого стекла в полусферическую форму диаметром 100 мм

В результате проведенного эксперимента получены образцы стекла, моллированного в вакуумные формы различной геометрии. В процессе

вакуумного моллирования плоского стекла в формы с закрепленным краем происходило изменение толщины стекла. Результаты эксперимента, представленные на рисунках 2.8–2.10 показали, что изменение толщины стекла на различных этапах эксперимента происходило неравномерно.

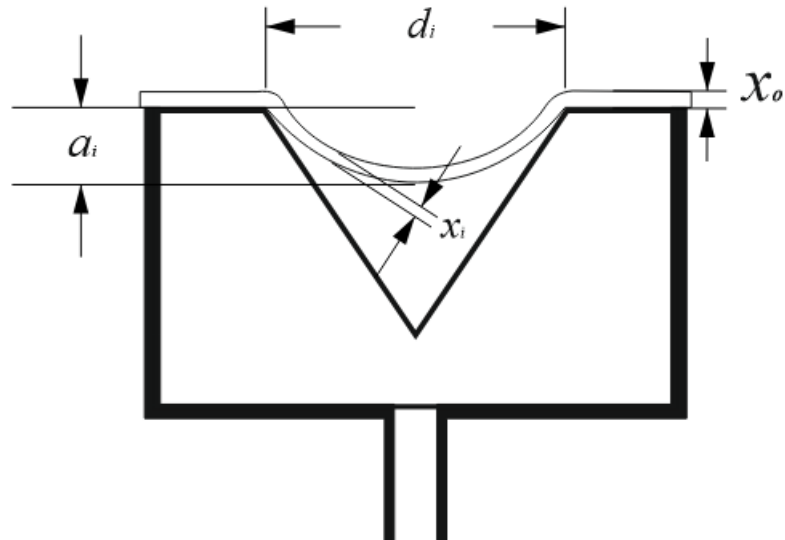
На первом этапе прогрева от температуры T_g до температуры T_f произошёл прогиб стекла, обусловленный гравитационными силами, но в силу того внутренняя полость формы была герметична прогиб составил в среднем по всем экспериментам 3,5 – 5 мм. При этом изменение толщины стекла составило 0,3-0,5 % от исходной.

На втором этапе эксперимента – непосредственно процессе вакуумного моллирования – изменение толщины стекла происходило согласно зависимостям показанным в таблицах 2.2 – 2.4 и рисунках 2.8 – 2.10.

На основе полученных данных изменения зависимости толщины стекла от глубины прогиба можно сделать вывод, что сразу же после создания разряжения внутри формы растяжение стекла происходило равномерно под действием атмосферного давления, как показано на рисунке 2.11. При этом границы обусловлены плоскостями формы, образующие касательные к сферическому сегменту.

Это предположение подтверждается практически мгновенным изменением толщины стекла как представлено на рисунках 2.8 и 2.9, если в конусных формах такое изменение в среднем составило 1,85 мм для конуса с углом при вершине 45°, 1,5 мм – 60°, 0,88 мм – 90° соответственно, то для цилиндрической формы такое изменение составило 3 мм или 50 % от общей толщины.

Стоит отметить, что дальнейшее изменение толщины стекла происходило по зависимостям, определяемым геометрией той или иной формы, причем линейную зависимость наблюдали только в конусной форме с углом при вершине в 60°, что подходит для дальнейшего исследования технологических параметров процесса моллирования.



Геометрические размеры: x_o — исходная толщина стекла; x_i — толщина растянутого стекла; a_i — глубина свободного прогиба; d_i — диаметр формы
Рисунок 2.11 — Схема изменения геометрии плоского стекла на этапе равномерного растяжения

Изменение толщины стекла в полусферической форме полностью определяется закономерностями свободного прогиба стекла, так как касательные к поверхности полностью совпадают с полусферой стекла.

Для подтверждения высказанных утверждений были созданы математические схемы изменения толщины стекла для различной геометрии форм, представленные на рисунке 2.12.

Изначально прогретый до температуры T_f плоский лист стекла прогибается под действием атмосферного давления с образованием сферического сегмента, ограниченного касательными поверхности формы. При дальнейшем моллировании и растяжении стекла часть его прилегает к поверхности формы и фиксируется при заданной толщине, при этом моментная толщина прилегания совпадает с соответствующей толщиной сферического сегмента. Определение толщины стекла в сферическом сегменте на каждый момент времени позволила рассчитать изменение толщины стекла по всей длине формы.

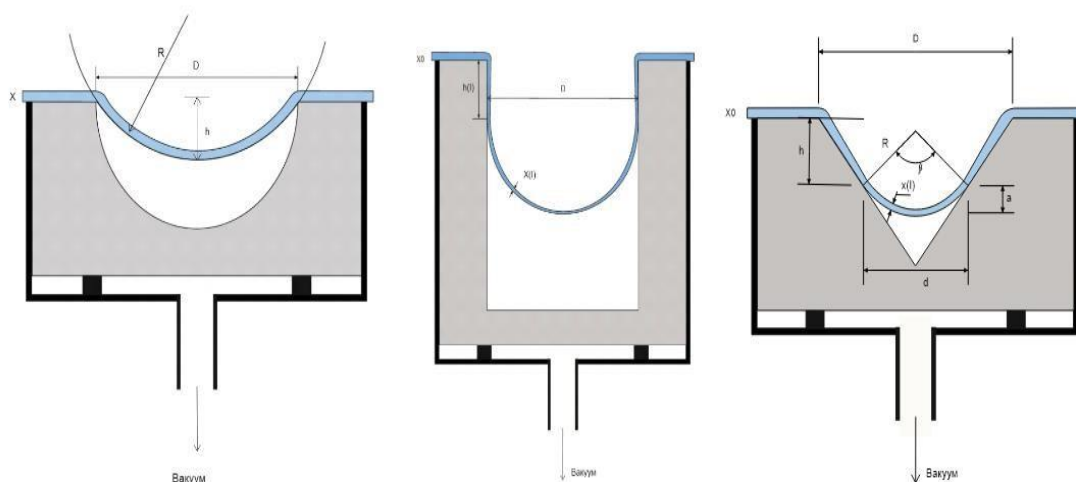


Рисунок 2.12 – Геометрия исследуемых форм

Для удобства анализа данные таблиц 2.2–2.4 привели к общему виду по глубине замера, представленные в таблице 2.5 и провели регрессионный анализ полученных данных для определения функциональных зависимостей изменения толщины моллируемого стекла x_i в зависимости от глубины h_i и типа формы, результаты которого представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Приведенные значения изменения толщины моллируемого стекла от глубины и типа формообразующего элемента

№ изм.	Глубина замера, h_i , мм	Толщина стекла x_i на глубине замера h_i , мм				
		Полусфера	Открытый цилиндр	Конус с углом при вершине		
				45°	60°	90°
1	0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
2	-10	2,9	2,5	3,5	4,0	4,8
3	-20	2,9	2,0	3,1	3,7	4,2
4	-30	3,0	1,75	2,6	3,1	3,6
5	-40	3,1	1,6	2,5	2,6	3,0
6	-50	3,2	1,5	2,2	2,4	2,0
7	-60	—	1,3	1,5	1,8	—
8	-70	—	1,2	1,3	1,3	—
9	-80	—	1,05	1,0	0,8	—
10	-90	—	0,9	0,8	—	—

Таблица 2.6 – Эмпирическая формула и среднеквадратичных отклонений для выбора типа форма

Тип формы		Эмпирическая формула	R ²
Угол при вершине	45	$x_i = 0,0002 \cdot h_i^2 - 0,0592 \cdot h_i + 4,2864$	0,9863
	60	$x_i = -0,0472 \cdot h_i + 4,5867$	0,9888
	90	$x_i = -0,0007 \cdot h_i^2 - 0,0243 \cdot h_i + 5,0286$	0,9865
Цилиндр		$x_i = 0,0002 \cdot h_i^2 - 0,0405 \cdot h_i + 2,8823$	0,9788
Полусфера		$x_i = 3$	

Как видно из представленных в таблице 2.6 зависимостей, линейное изменение толщины стекла в процессе вакуумного моллирования листового стекла наблюдается только в конусную форму с углом при вершине в 60°, поэтому все дальнейшие исследования процесса моллирования будут опираться на форму этой геометрии.

Проведенное исследование позволило определить геометрическую форму при моллировании, в которой толщина стекла изменяется линейно. Этот факт позволяет значительно упростить дальнейшее исследование процесса моллирования в вакуумную форму с закреплённым краем.

2.3 Исследование влияния технологических параметров процесса моллирования плоского стекла в вакуумную форму с закреплённым краем

На данном этапе исследования ставили задачу определения оптимальных технологических параметров моллирования (температуру, относительное разрежение в форме) для получения общей картины процесса формования, исследуемым методом моллирования.

В качестве фиксированных параметров для исследования были взяты:

- листовое стекло толщиной 6 мм, соответствующего ГОСТ 111-2014 состава, приведенного в таблице 2.1.;
- геометрия формы: конус. Диаметр основания 100 мм. Угол конуса при вершине 60°.
- формообразующий материал для вакуумной формы – гипсо-кристобалитовая смесь с газопроницаемостью 42 %;

- камерная печь с характеристиками температурного градиента, показанными на рисунке 2.2;
- экспериментальная установка, представленная на рисунке 2.3;
- последовательность подготовительных операций разогрева образца стекла и формы, как указано в разделе 2.1 «Разработка метода исследования вязкости плоских стекол» на страницах 51,52.

В качестве исследуемых параметров были взяты:

- температурный интервал моллирования 720 – 810 °С, соответствующий исследуемому интервалу моллирования плоского стекла;
- остаточное разряжение камере 0,05 – 0,09 МПа;
- временной интервал моллирования.

Для определения контролируемых и фиксированных параметров была разработана схема проведения эксперимента, представленная в таблице 2.7

Изначально прогретый до температуры T_f плоский лист стекла прогибается под действием атмосферного давления с образованием сферического сегмента, ограниченного касательными поверхности формы. При дальнейшем моллировании и растяжении стекла часть его прилегает к поверхности формы и фиксируется при заданной толщине, при этом моментная толщина прилегания совпадает с соответствующей толщиной сферического сегмента. Определение толщины стекла в сферическом сегменте на каждый момент времени позволит рассчитать изменение толщины стекла по всей длине формы.

В приложении Б в таблицах Б.7 – Б.10 показаны экспериментальные данные изменение глубины прогиба плоского стекла толщиной 6 мм при остаточном разряжении в форме в диапазоне 0,1 и 0,05 МПа и фиксированных температурах 720, 750, 780 и 810 °С.

Таблица 2.7 – Схема проведения исследования

Меняемые технологические параметры	Контролируемые параметры эксперимента	Граничные параметры эксперимента
3. Измерение глубины прогиба образца стекла при фиксированных значениях температуры и разряжения		
Температура, °C Остаточное давление МПа	Глубина прогиба стекла, мм Время, мин.	Температурный интервал - 720 – 810 °C (дискретный с шагом в 30 °C); Интервал остаточного разряжения - 0,05 – 0,09 МПа (дискретный с шагом в 0,01 МПа)
2. Измерение глубины прогиба образца стекла при фиксированных разряжении и скорости нагрева.		
Остаточное разряжение МПа	Глубина прогиба стекла, мм Температура, °C,	Температурный интервал - 720 – 810 °C ; Интервал остаточного разряжения - 0,05 – 0,09 МПа (дискретный с шагом в 0,01 МПа); Скорость нагрева системы - 10 °C/мин;
3. Определение оптимального соотношения температура-разряжение в форме.		
Остаточное разряжение МПа	Температура, °C	Максимальное заполнение формы, %; Интервал остаточного разряжения 0,05 – 0,09 МПа (дискретный с шагом в 0,01 МПа); Скорость нагрева системы - 10 °C/мин.

На рисунках 2.13 – 2.18 представлены графические данные измерений глубины прогиба образца стекла при фиксированных значениях температуры и разряжения.

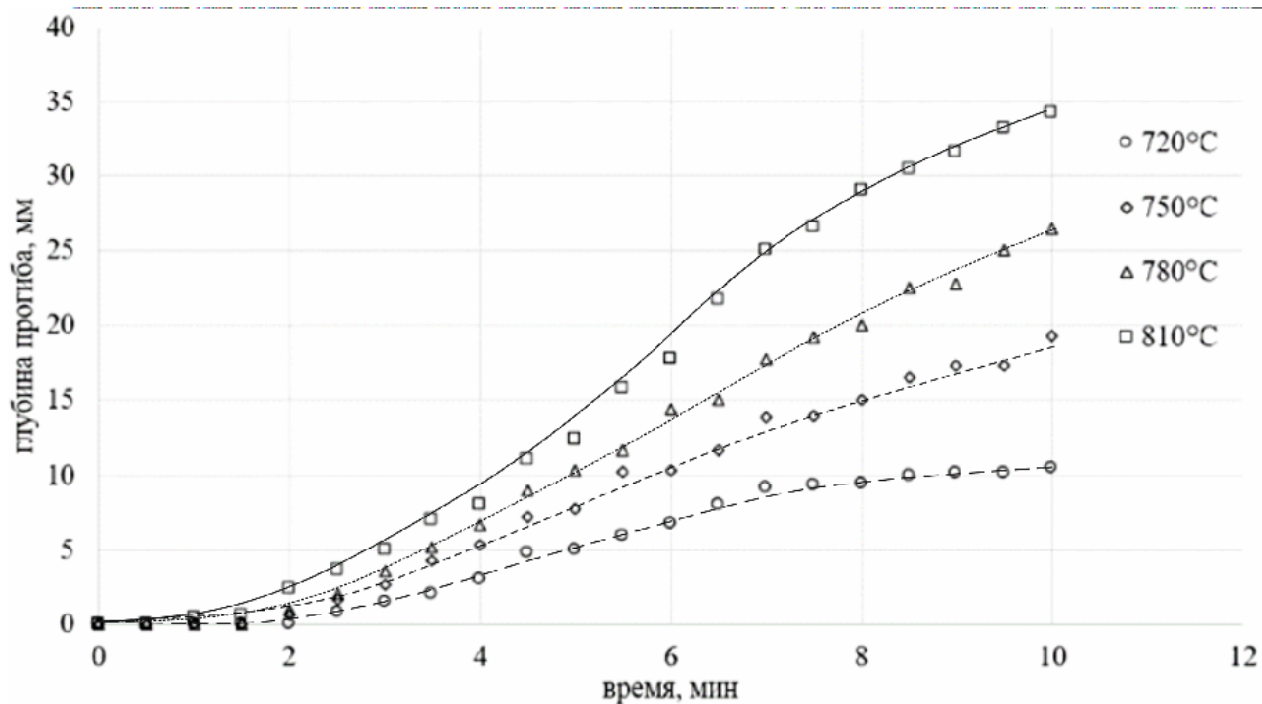


Рисунок 2.13 – Изменение глубины прогиба образца стекла при фиксированных значениях температуры и остаточном давлении в форме 0,1 МПа

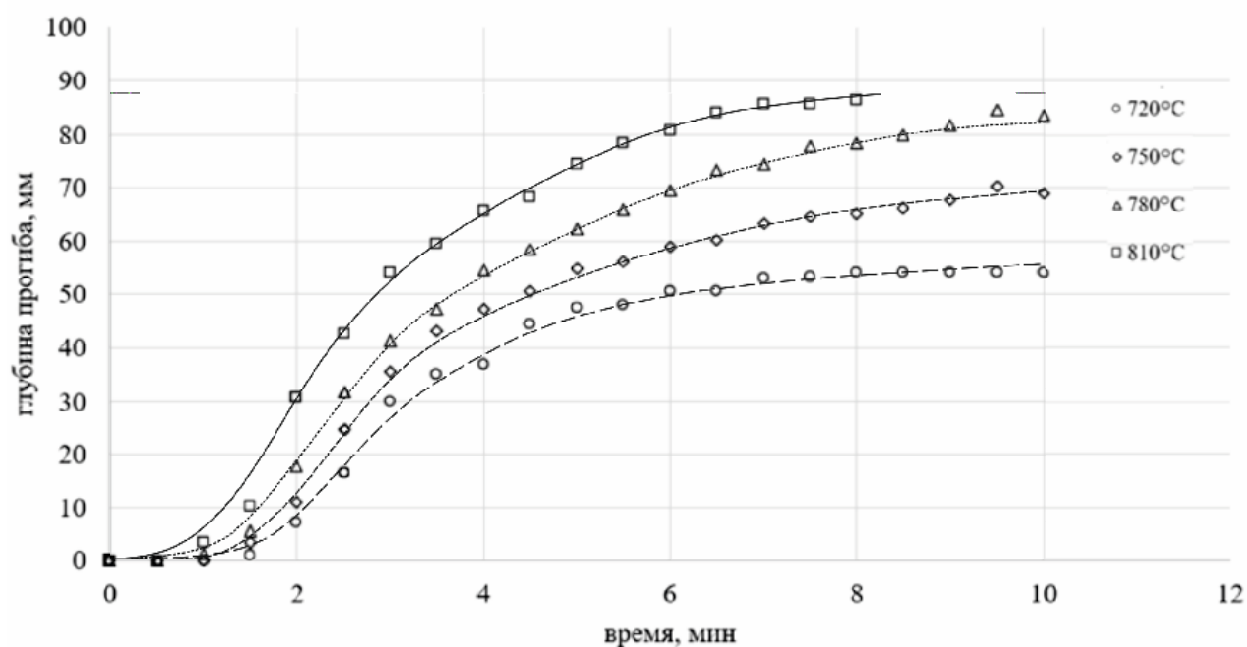


Рисунок 2.14 – Изменение глубины прогиба образца стекла при фиксированных значениях температуры и остаточном разрядении в форме 0,09 МПа

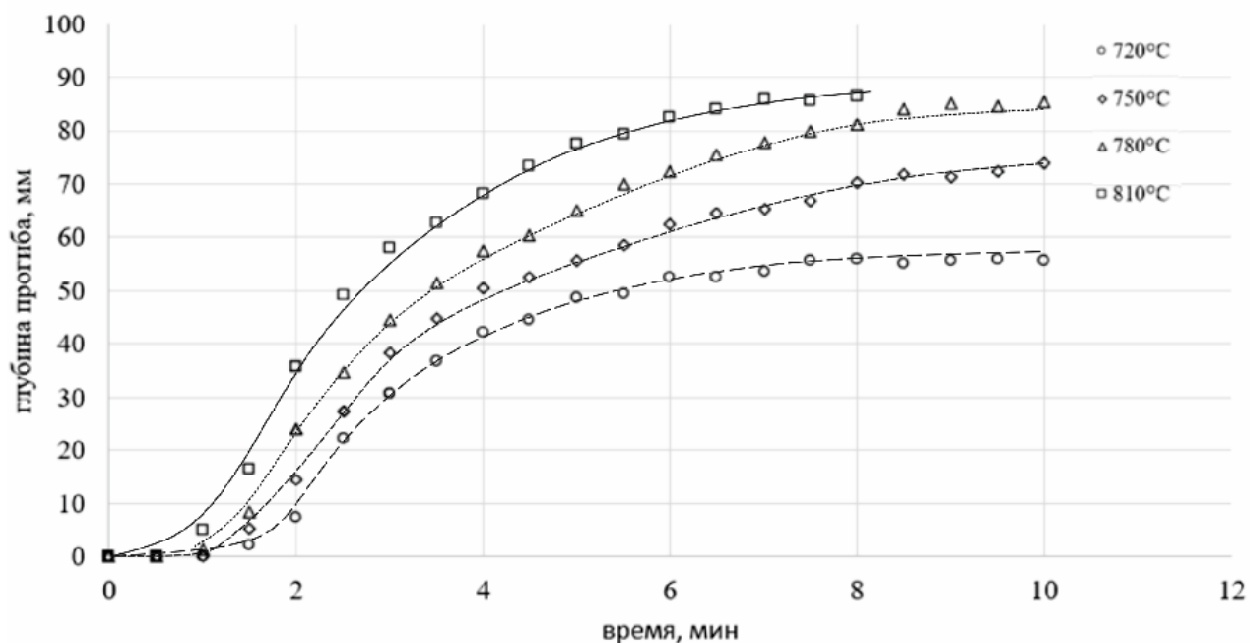


Рисунок 2.15 – Изменение глубины прогиба образца стекла при фиксированных значениях температуры и остаточном разряжении в форме 0,08 МПа

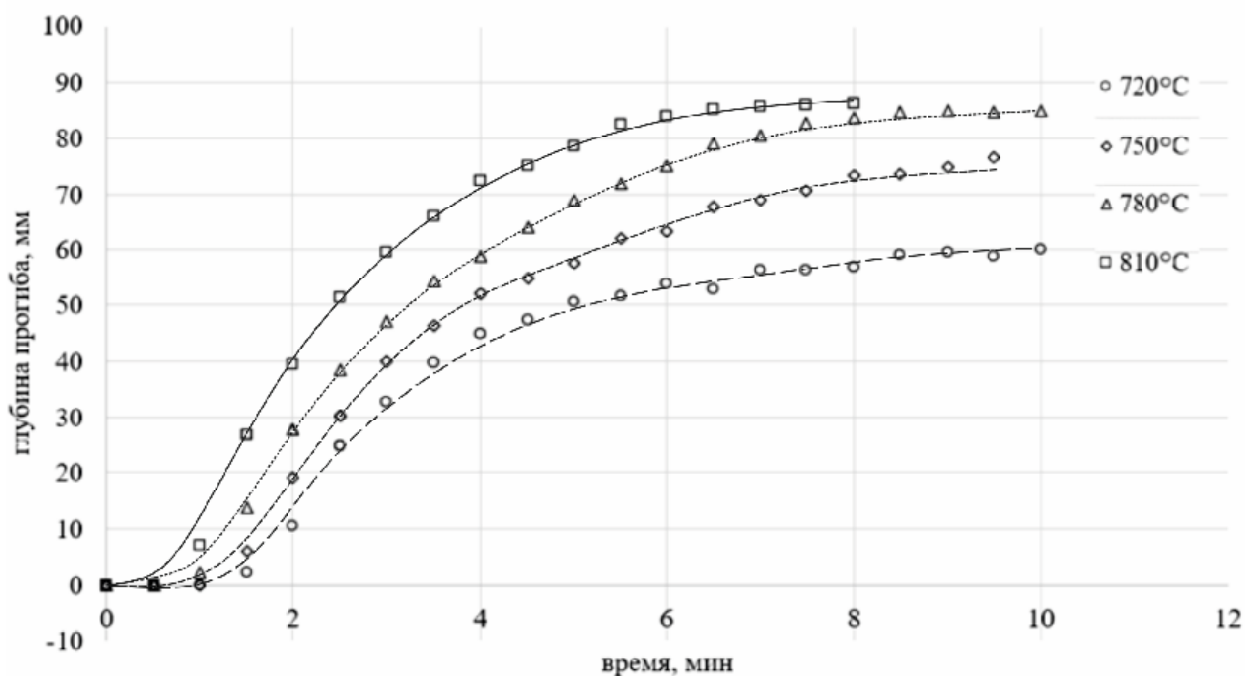


Рисунок 2.16 – Изменение глубины прогиба образца стекла при фиксированных значениях температуры и остаточном разряжении в форме 0,07 МПа

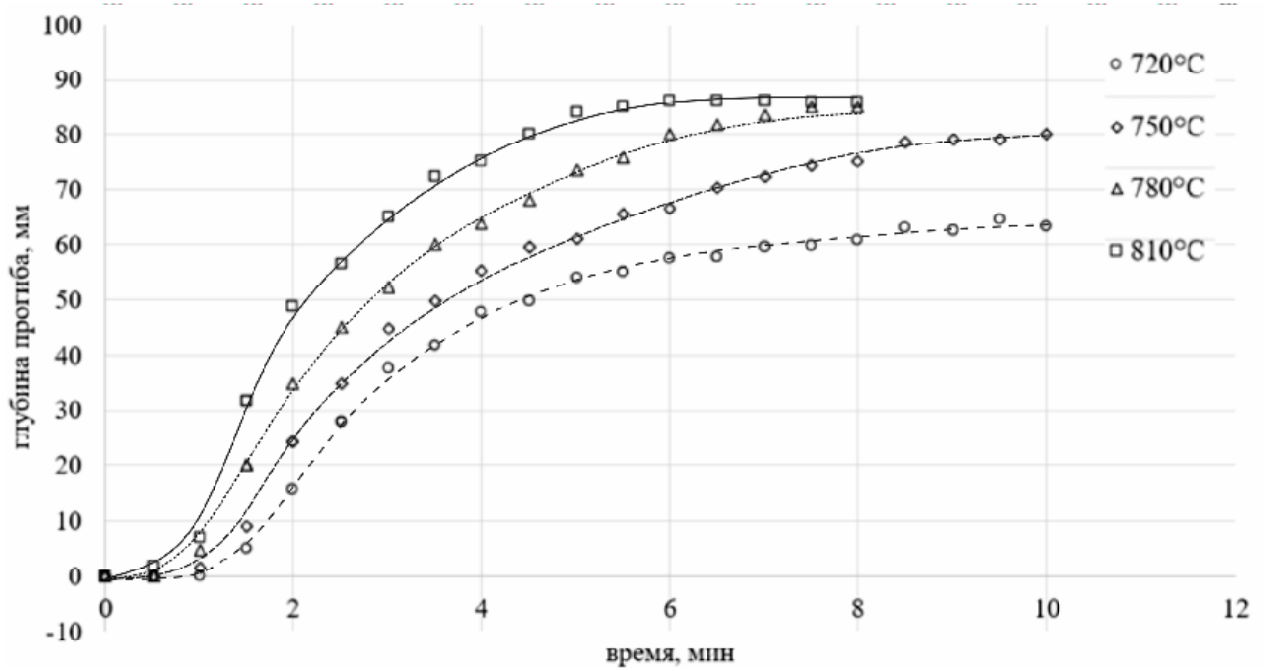


Рисунок 2.17 – Изменение глубины прогиба образца стекла при фиксированных значениях температуры и остаточном разрядении в форме 0,06 МПа

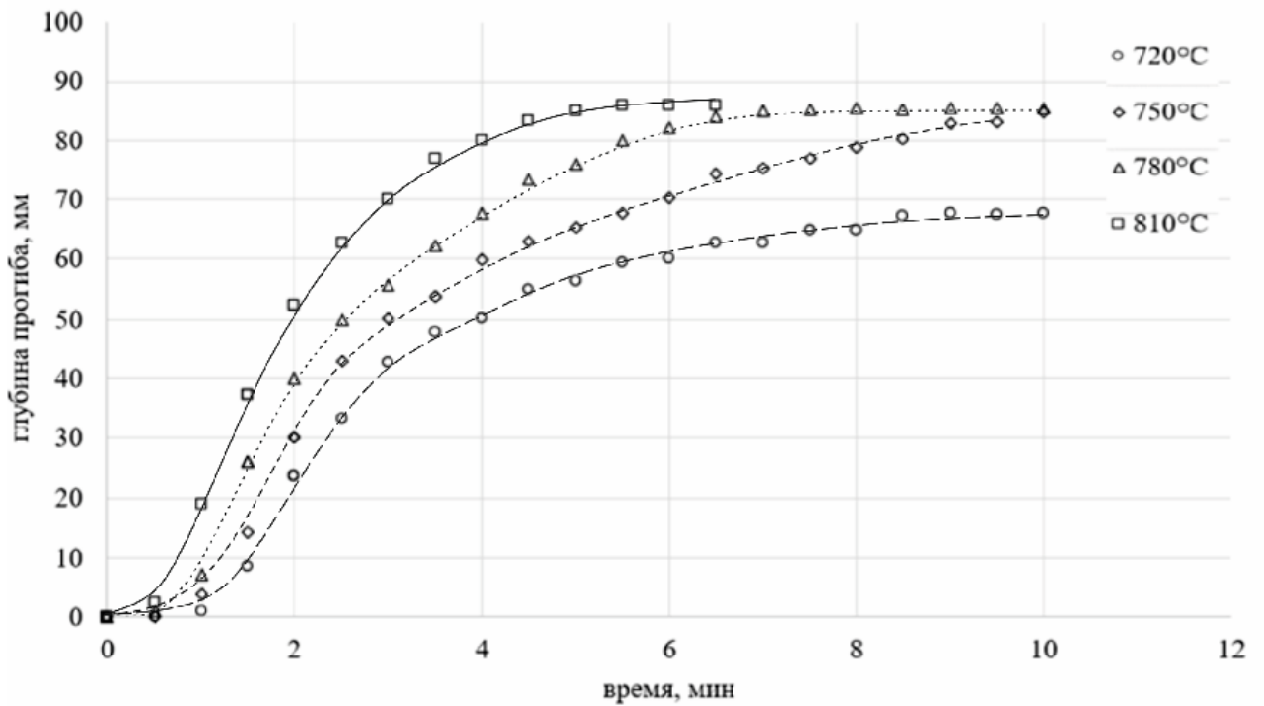


Рисунок 2.18 – Изменение глубины прогиба образца стекла при фиксированных значениях температуры и остаточном разрядении в форме 0,05 МПа

Из представленных на рисунках 2.13 – 2.18 данных видно, что при отсутствии разряжения в форме листовое стекло при температурах до 820 °С не заполняет форму. С изменением остаточного разряжения в форме от 0,09 до 0,05 МПа происходит снижение температуры от 810 до 780 °С, при которой форма заполняется полностью. Дальнейшее изменение остаточного разряжения не приводит к значительному снижению температуры. Средняя температура полного заполнения формы для данного типа стекла, определяемая как среднеарифметическое значение составляет 800 °С, а среднее остаточное разряжение в форме составляет 0,06 МПа. Среднее время заполнения формы для данного типа стекла – 6 мин

Данное исследование позволило определить минимальные температуры, при которых деформация стекла под заданными параметрами механического воздействия (атмосферного давления) из пластической переходит в жидкую, т.е. начинает течь. Это позволяет снизить температуру формования стекла данным методом моллирования.

Однако для определения параметров заполнения формы в практической работе при заполнении формы без принудительной фиксации температуры требует проведение эксперимента в области температур $T_g - T_f$. На рисунке 2.19 показаны изменение глубины прогиба образца стекла при фиксированных остаточном разряжении и скорости нагрева при соблюдении граничных параметров, указанных в таблице 2.7.

Из данных, показанных на рисунке 2.19 видно, что заполнение конусной формы в исследуемом интервале давления при повышении температуры при фиксированном остаточном разряжении в форме происходит в диапазоне от 780 до 820 °С, а при отсутствии разряжения в форме при максимальной температуре форма заполняется только на 45 % по глубине. Время заполнения формы колеблется от 14 до 19 мин в зависимости от остаточного разряжении в форме.

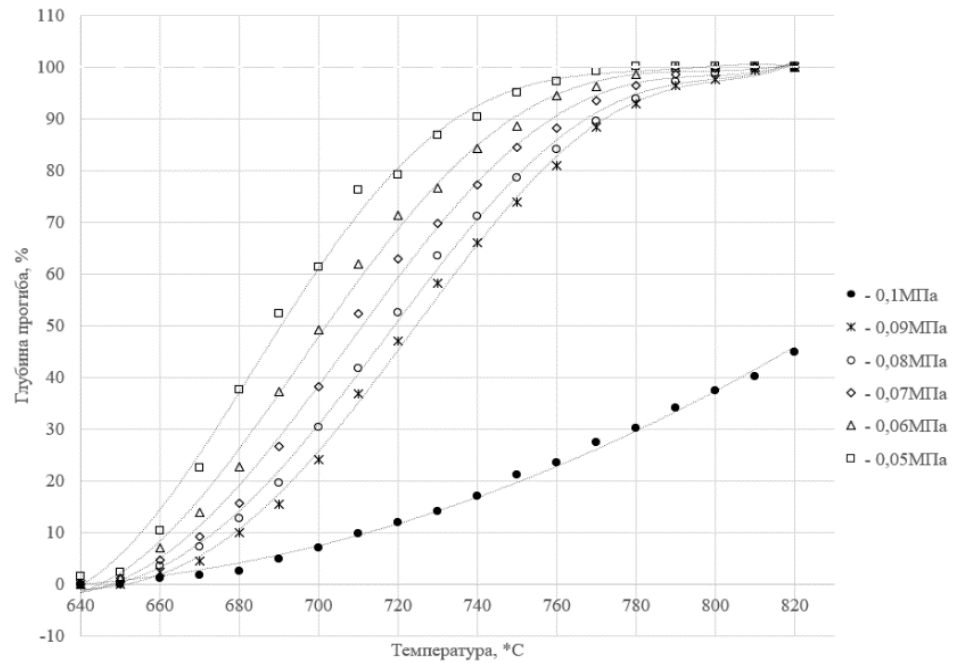


Рисунок 2.19 – Изменение глубины прогиба стекла при моллировании от температуры при фиксированной скорости нагрева системы и остаточном давлении

Для определения оптимального соотношения температура-разряжения в системе из проведенного исследования из рисунка 2.19 был выделен период, при котором происходило заполнение формы, представленной на рисунке 2.20.

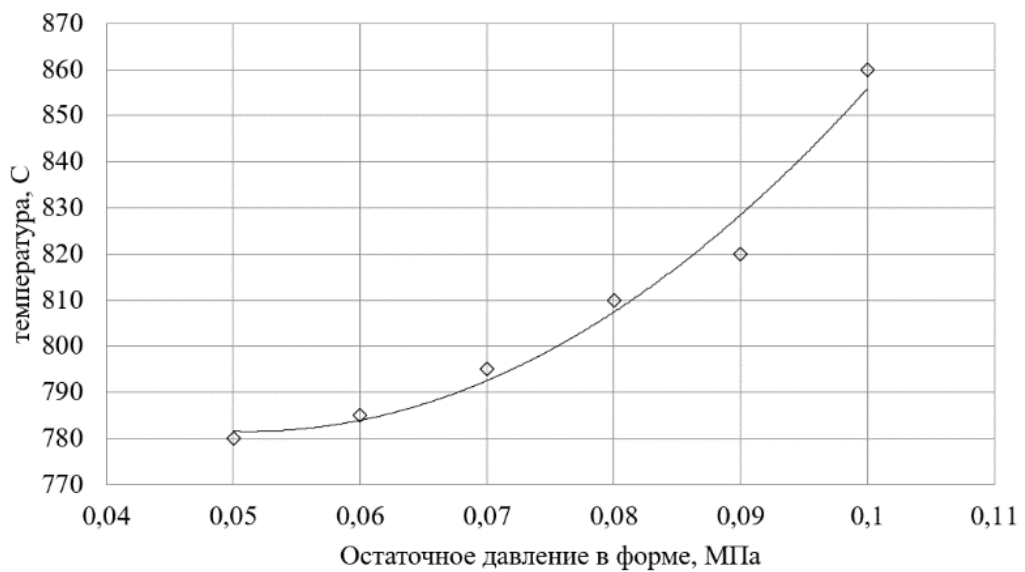


Рисунок 2.20 – Зависимость температуры и разряжения при полном заполнении конусной формы

Анализ результатов исследований, представленных на рисунке 2.20, показал, что оптимальные значения зависимости температуры и разряжения могут быть аппроксимированы кривой, которая описывается следующей формулой:

$$T = 3,8 \exp(3,25 \cdot P) + 775,71 \quad (2.1)$$

В данной формуле свободный член практически совпадает с температурой при нулевом остаточном давлении в форме и обозначив его как (T_o) и сделав преобразование, выражение (1) приобретает следующий вид

$$P = 0,31 \ln(T - T_o) - 0,41, \quad (2.2)$$

где T – температура, °С;

T_o – температура заполнения при нулевом остаточном давлении в форме, °С;

P – остаточное разряжение в форме моллирования, МПа.

Коэффициент среднего квадратичного отклонения составляет $R^2=0,993$, что является удовлетворительным результатом.

На способ «Вакуумного моллирования и устройство его реализации» был получен патент №2607841 [63], что подтверждает новизну результатов исследования.

2.4 Определение коэффициентов для расчета вязкости по методу Охотина в диапазоне вязкости $10^6 - 10^9$ П

Для дальнейшего исследования процесса вакуумного моллирования плоских стекол в форму с закрепленным краем возникает необходимость определения зависимости параметров деформации стекла и его вязкости. Подобные исследования в литературе [65] основываются на определении математических зависимостей вязкости от деформационных характеристик исследуемого образца: растяжение, кручение, вдавливание индентора в образец. Главным недостатком всех этих методов является определение фиксированных абсолютных значений величин вязкости, что не всегда удобно

при сравнении параметров вязкости различных стекол, так как для построения графической зависимости вязкости от температуры или деформации, требуется проведения нескольких экспериментов.

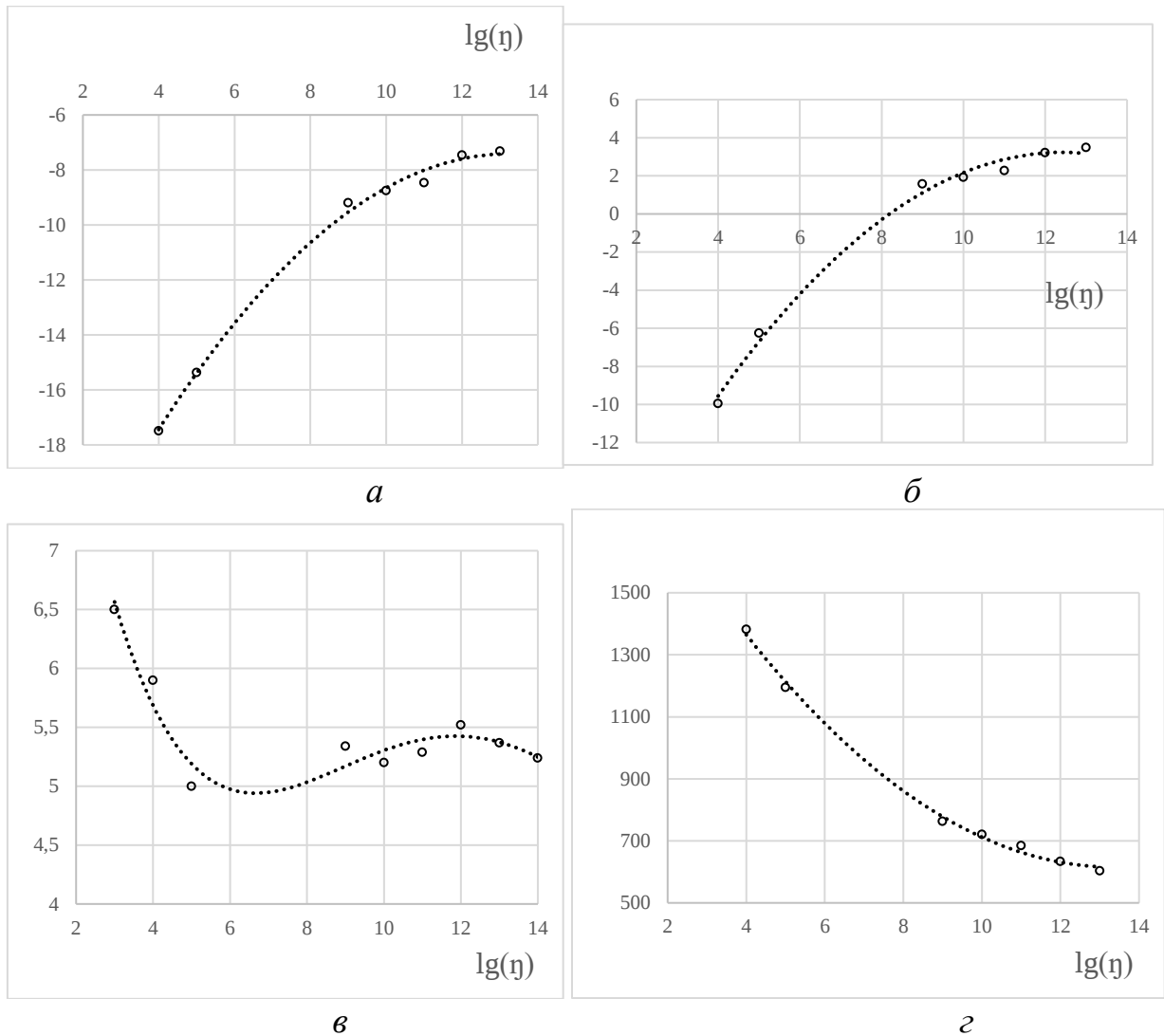
В [66,67] предложены способы определения вязкостных характеристик в зависимости от состава различных стекол. Исходя из специфики исследуемого материала, плоского листового стекла, наиболее удобным для проводимого исследования является метод Охотина [31]. Однако в справочной литературе [31] для исследуемого интервала вязкости $10^6 - 10^9$ П не указаны расчетные коэффициенты, а в доступных источниках [68] искомые коэффициенты приведены, но они разнятся со справочными для известного интервала. Исходя из этого возникает необходимость определения (уточнения) расчетных коэффициентов для расчета зависимости вязкости от температуры по методу Охотина для исследуемого интервала вязкости $10^6 - 10^9$ П [69].

В таблице 2.8 приведены расчетные коэффициенты из [31].

Таблица 2.8– Константы для расчета температуры по методу Охотина [31]

lg η	Константы			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
3	-22,87	-16,1	6,5	1700,4
4	-17,49	-9,95	5,9	1381,4
5	-15,37	-6,25	5	1194,27
6	—	—	—	—
7	—	—	—	—
8	—	—	—	—
9	-9,19	1,57	5,34	762,5
10	-8,75	1,92	5,2	720,8
11	-8,47	2,27	5,29	683,8
12	-7,46	3,21	5,52	632,9
13	-7,32	3,49	5,37	603,4
14	-6,29	4,01	5,24	561,5

Для определения коэффициентов в диапазоне $10^6 - 10^9$ П были построены эмпирические зависимости их значений от логарифма вязкости и представленные на рисунке 2.21.



a – коэффициент А; $\bar{b}$ – коэффициент В; $\bar{c}$ – коэффициент С;
 $\bar{d}$ – коэффициент D

Рисунок 2.21 – Эмпирические зависимости коэффициентов формулы Охотина от расчетных логарифмов вязкости

На основе данных, представленных на рисунке 2.21, видно, что во всех четырех случаях прослеживаются функциональные зависимости. Были рассчитаны полиномы и определены среднеквадратичные отклонения функциональных значений от эмпирических, представленные в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Значение полиномиальных функций и их среднеквадратичное отклонение от экспериментальных значений

Коэффициент	Полином	R ²
A	$A = -0,117(\lg(\eta))^2 + 3,1026\lg(\eta) - 27,976$	0.9963
B	$B = -0,18(\lg(\eta))^2 + 4,4746\lg(\eta) - 24,277$	0.9936
C	$C = 0,0005(\lg(\eta))^4 - 0,0268(\lg(\eta))^3 + 0,4611(\lg(\eta))^2 - 3,2074\lg(\eta) + 12,719$	0.9115
D	$D = 8,5537(\lg(\eta))^2 - 228,62\lg(\eta) + 2130,8$	0.9972

В таблице 2.10. представлены расчетные значения коэффициентов, определенные исходя из полиномиальных функций таблицы 2.9.

Таблица 2.10 – Расчетные значения коэффициентов

lg(η)	Константы			
	A	B	C	D
4	-17,44	-9,26	5,68	1353,18
5	-15,39	-6,4	5,17	1180,3
6	-13,57	-3,91	4,93	1051,2
7	-11,99	-1,77	4,87	939,5
8	-10,64	0	4,9	849,28
9	-9,53	1,41	4,94	766,07
10	-8,65	2,47	4,96	699,97
11	-8	3,16	4,88	650,98
12	-7,59	3,5	4,69	619,09
13	-7,42	3,47	4,35	604,32

Для проверки правильности расчета коэффициентов были построены зависимости вязкость-температура для образца №1 из таблицы 1.1. Данный образец имеет в своем составе K_2O в количестве 0,12 мас.%. что несколько не соответствует требованиям расчету вязкости по методу Охотина [31,70], но с учетом того, что среднее отклонение концентраций K_2O по всем образцам составляет менее 0,08 мас. %, что меньше предела точности расчета, примем этот факт за относительное допустимое отклонение.

В качестве допущения будем считать, что влияние K_2O в представленном образце на расчетное значение вязкости имеет одинаковое

значение с Na_2O и массовые % K_2O и Na_2O для дальнейшего расчета суммируются.

Исходя из заявленных допущений расчет производится по формуле

$$T = 15,14 \cdot A + 10,76 \cdot B + 1,36 \cdot C + D, \quad (2.3)$$

где T – температура, соответствующая заданному значению логарифма вязкости;

A, B, C, D – безразмерные коэффициенты Охотина.

На рисунке 2.22 представлены графики зависимости $lg(\eta) = f(T)$ для экспериментальных и расчетных точек.

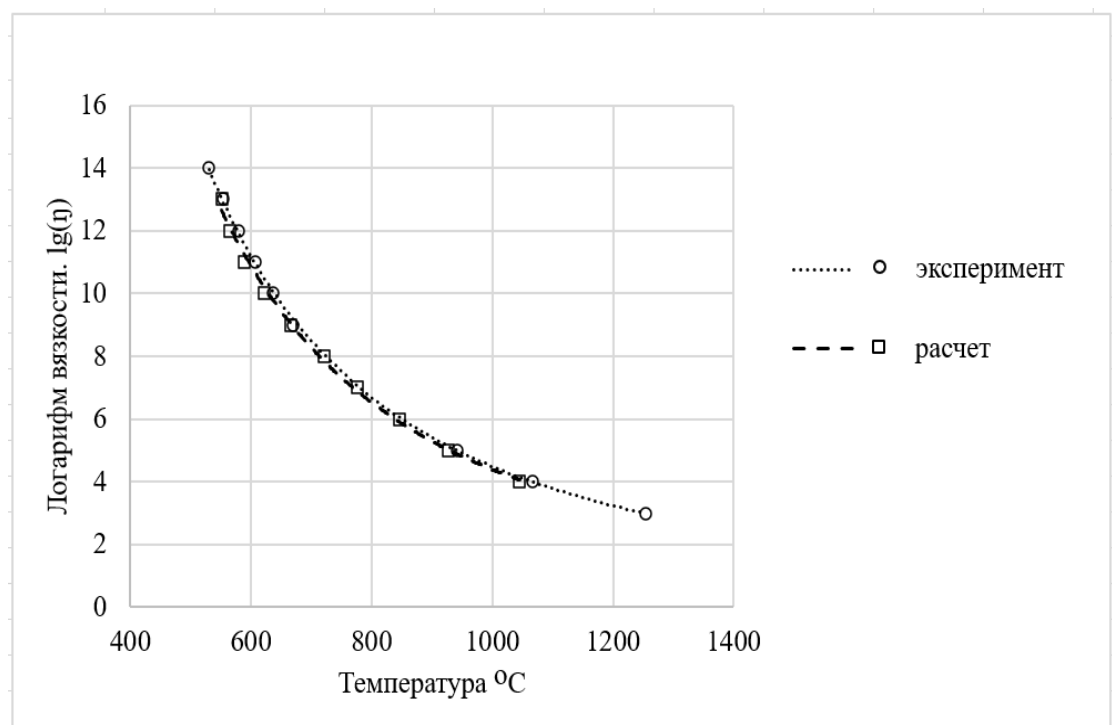


Рисунок 2.22 – Графики $lg(\eta) = f(T)$ для экспериментальных и расчетных точек

Для описания и дальнейшего анализа данных провели регрессионный анализ точечного графика, представленного на рисунке 2.22, который установил функциональную зависимость между переменными как степенную функцию, показанную в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Функциональные зависимости расчетных значений

Зависимость	Функция	R ²
экспериментальная	$lg(\eta) = 10^6 \cdot T^{(-1,789)}$	0,9996
расчетная	$lg(\eta) = 9,4 \cdot 10^5 \cdot T^{(-1,777)}$	0,9960

Для точности расчетных и табличных данных рассчитали среднее отклонение в температурном интервале 650 – 850 °С.

Таблица 2.12 – Расчет среднего отклонения значения логарифма вязкости.

T, °C	lg(η) _{эксп.}	Lg(η) _{расч.}	lg(η) _э -g(η) _р /21
650	9,28	9,46	0,0194
660	9,03	9,21	0,0196
670	8,79	8,97	0,0198
680	8,56	8,73	0,0200
690	8,34	8,51	0,0202
700	8,13	8,30	0,0203
710	7,93	8,09	0,0205
720	7,73	7,89	0,0207
730	7,54	7,70	0,0209
740	7,36	7,52	0,0210
750	7,19	7,34	0,0212
760	7,02	7,17	0,0214
770	6,86	7,00	0,0215
780	6,70	6,84	0,0217
790	6,55	6,69	0,0218
800	6,40	6,54	0,0220
810	6,26	6,40	0,0221
820	6,13	6,26	0,0223
830	5,99	6,13	0,0224
840	5,87	6,00	0,0226
850	5,74	5,88	0,0227
Среднее значение отклонения			0,0212

Как видно из данных таблицы 2.12 среднее отклонение составляет не более 2 %, что является удовлетворительным для проведения дальнейших исследований.

Данное уточнение коэффициентов позволяет использовать метод Охотина для построения небольших отрезков функциональных зависимостей

вязкости от температуры с допустимой точностью, не прибегая к построению полной кривой.

2.5 Исследование процессов зависимости деформации и вязкости при вакуумном моллировании плоских стекол

Как уже отмечалось ранее в таблице 1.1, составы листовых стекол, соответствующих ГОСТ 111-2014, отличаются по составу, что в значительной степени может влиять на значение вязкости стекла, а, следовательно, на технологические параметры процесса моллирования [66,67].

Были рассчитаны по методу Охотина отклонение вязкости стекол с максимальным отклонением по составу образцы 1 и 4 составы которых представлены в таблице 1.1.

Расчет производился по формуле Охотина с учетом поправочных коэффициентов и уточненных констант, рассчитанных в главе 2.4 страницы 69–74:

$$T = AP_{Na_2O} + B(P_{MgO} + P_{CaO}) + CP_{Al_2O_3} + D, \quad (2.4)$$

где T – температура, °C;

P – содержание в стекле соответствующих оксидов в мас. % таблица 1.1;

A, B, C и D – константы М. В. Охотина.

Таблица 2.13 – Значения расчетных коэффициентов для диапазона вязкости $10^6 - 10^9$ П

lg(η)	Константы				Поправочный коэффициент
	A	B	C	D	
5	-15,39	-6,4	5,17	1201,54	6
6	-13,57	-3,91	4,93	1067,01	5
7	-11,99	-1,77	4,87	949,59	1
8	-10,64	0	4,9	849,28	1
9	-9,53	1,41	4,94	766,07	1,5

В таблице 2.14 приведены расчетные данные зависимости вязкости от температуры по методу Охотина для образцов стекла № 1 и 4 для интервала вязкости 10^6 – 10^9 П.

Таблица 2.14 – Значение расчетных параметров температуры и логарифма вязкости стекол

№ образца	Температурное значение логарифма вязкости. °C				
	5	6	7	8	9
1	914,58	834,94	762,00	702,32	652,46
4	925,97	845,98	774,21	713,95	663,37

На рисунке 2.23 показаны значения отклонений логарифма вязкости образцов 1 и 4 в исследуемом диапазоне 10^6 – 10^9 П.

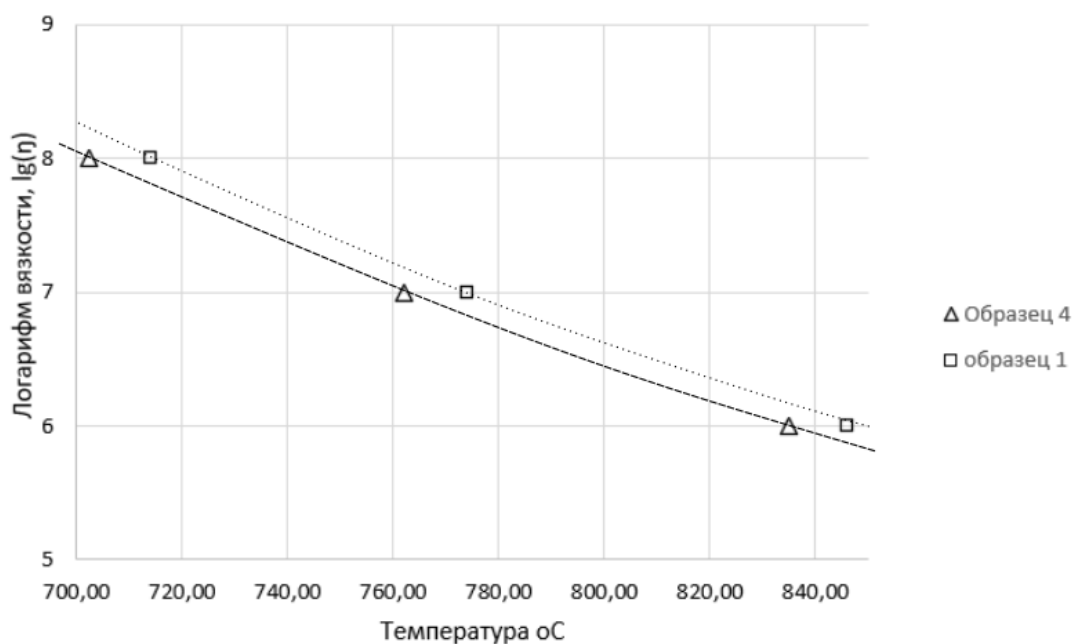


Рисунок 2.23 – Температурно-вязкостная зависимость образцов №1 и 4

Из данных таблицы 2.14 и рисунка 2.23 видно, что отклонение по температуре при одной и той же вязкости может составлять 10 – 15 °C, что требует значительной корректировки технологических параметров процесса моллирования плоского стекла.

Данное исследование еще раз подтверждает необходимость корректировки температурного режима моллирования плоского стекла, а также разработку метода оперативного входного контроля вязкости на производстве. Особую важность контроль вязкости приобретает при моллировании стекла в пограничных условиях пластичность-жидкое состояние.

Для дальнейшего анализа плоских стекол проведем исследование образцов стекла № 1 и 4 на определения взаимосвязи температуры и деформации в процессе вакуумного моллирования.

В качестве фиксированных параметров для исследования взяли:

- листовое стекло, образцы № 1 и 4, из таблицы 1.1. толщиной 6 мм;
- геометрия формы: конус. Диаметр основания 100 мм. Угол конуса при вершине 60°.
- формообразующий материал для вакуумной формы – гипсо-кристобалитовая смесь с газопроницаемостью 42 %, рисунок 2.1.;
- камерная печь с характеристиками температурного градиента, показанными на рисунке 2.2;
- экспериментальная установка, показанная на рисунке 2.3;
- последовательность подготовительных операций разогрева образца стекла и формы, как указано в разделе 2.1 «Разработка метода исследования вязкости плоских стекол» страницы 47–53.

В качестве исследуемых параметров были взяты:

- температурный интервал моллирования 620 – 820 °С, соответствующий исследуемому интервалу моллирования плоского стекла;
- остаточное разряжение в камере 0,05 МПа;
- временной интервал моллирования.

На рисунке 2.24 показаны результаты проведенного исследования.

Результаты исследования показали, что образец № 4 является более легкоплавким, по сравнению с образцом № 1, т.е. одну и ту же глубину прогиба в конусную форму образец № 1 достигает при более низкой температуре.

Стоит также отметить, что разница ΔT , соответствующая разбросу температур при одной и той же глубине, соответствует разнице температур на зависимости, показанной на рисунке 2.23.

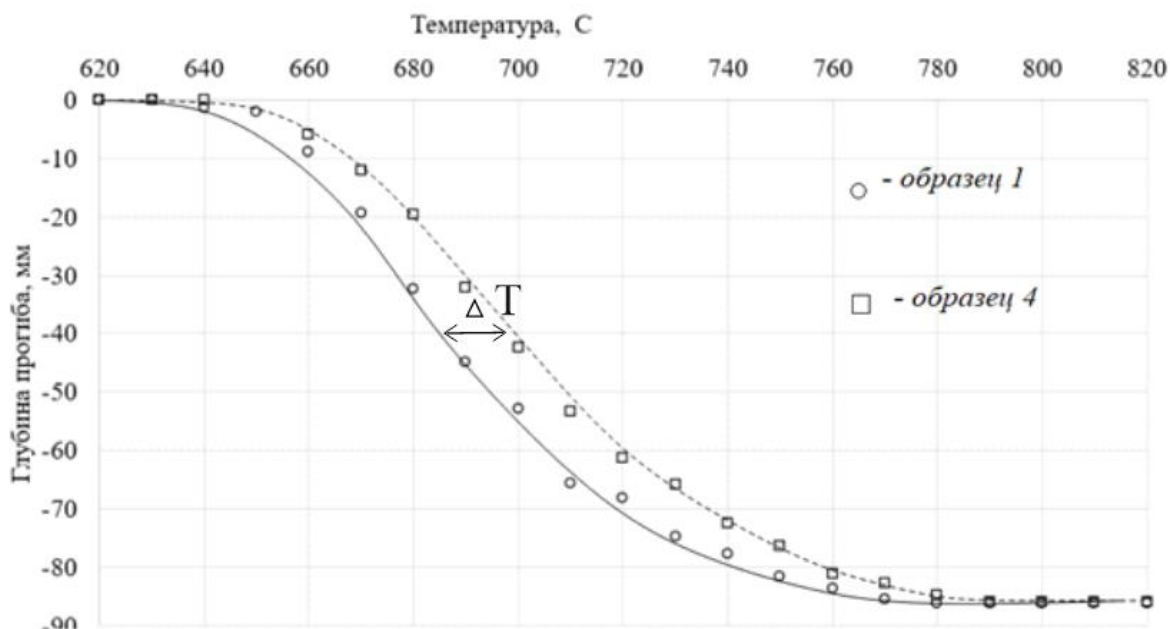


Рисунок 2.24 – Деформационно-температурная зависимость испытания образцов № 1 и 4

В таблице 2.15 представлены экспериментальные данные вакуумного моллирования исследуемых образцов в конусную форму.

Проведенное исследование подтвердило различные физические свойства испытуемых образцов.

Для определения связи деформации плоского стекла с его вязкостными характеристиками были исследованы данные, представленные на рисунках 2.23 и 2.24. Представленные на рисунках графики были совмещены по общей температурной оси. Результаты представлены на рисунке 2.25. Из совмещенных графиков видно, что на участке линейного растяжения стекла *Б* разница температур соответствует аналогичной разнице температур на участке измерения вязкости.

Таблица 2.15 – Средние значения температурно-деформационных параметров эксперимента

Температура, °С	Деформация образца №1, мм	Деформация образца № 4, мм
620	0	0
630	0	0
640	-1,3	0
650	-2,1	1
660	-8,9	-6
670	-19,4	-12
680	-32,4	-19,6
690	-45	-32,1
700	-52,8	-42,4
710	-65,6	-53,3
720	-68,1	-61,3
730	-74,7	-66
740	-77,8	-72,5
750	-81,7	-76,3
760	-83,6	-81,2
770	-85,4	-82,8
780	-86,1	-84,8
790	-86,1	-86
800	-86,1	-86
810	-86,1	-86
820	-86,1	-86

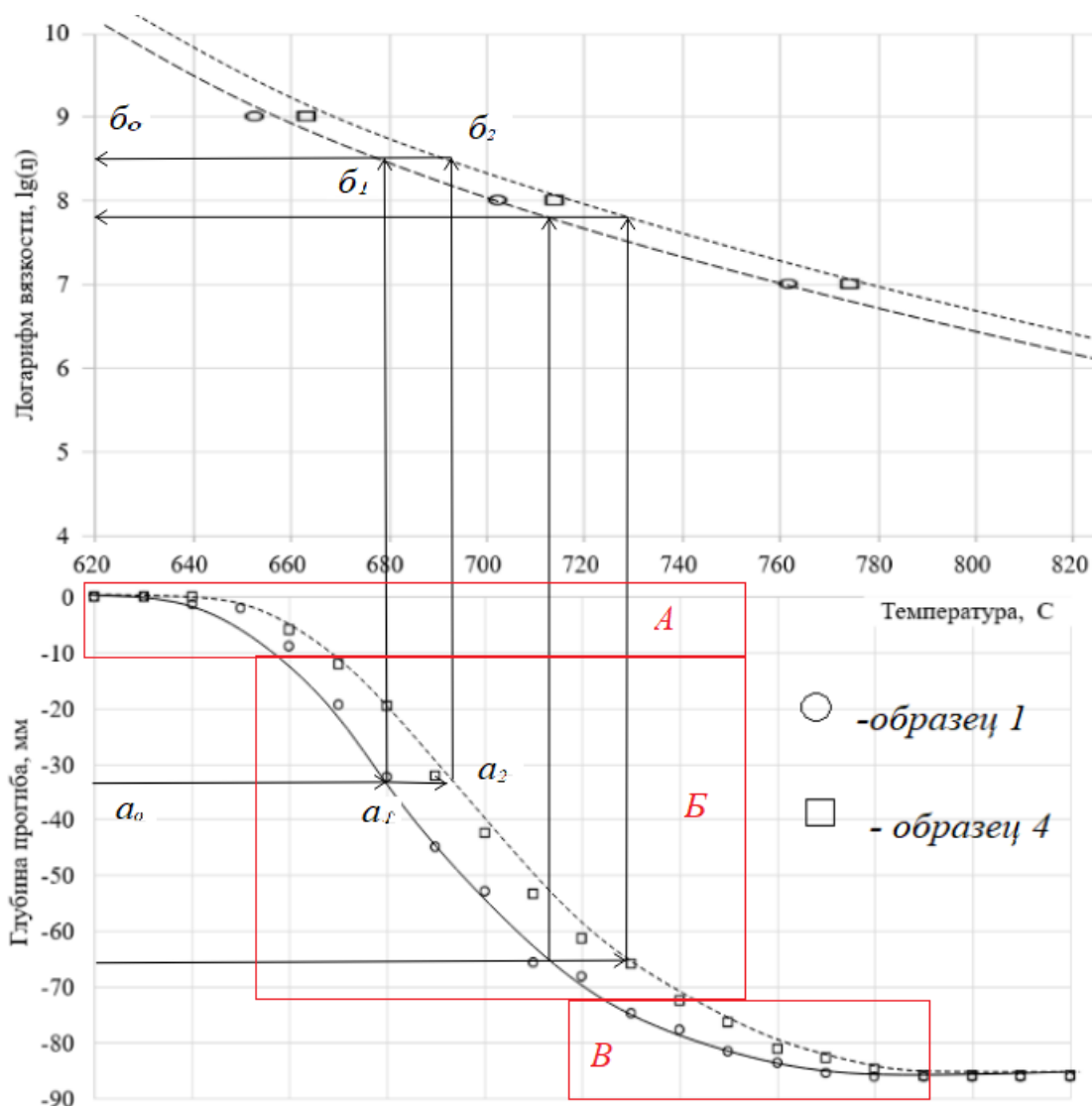
Анализируя данные, представленные на рисунке 2.25. можно сделать следующие заключения:

– моллирование в коническую форму состоит из трех этапов:

стадия *A* – соответствует образованию полусферического сегмента, ограниченного касательными, лежащими на боковой грани формы;

стадия *B* – соответствует линейному растяжению стекла по боковой поверхности конуса;

стадия *B* – соответствует формированию вершины конуса.



A – зона формирования полусферического сегмента; B – зона линейного растяжения; B – зона формирования вершины конуса; a_o – глубина прогиба, соответствующая образцам 1 – a_1 и 4 – a_2 ; b_o – логарифм вязкости, соответствующий глубине прогиба a_o для образцов 1 – a_1 и 4 – a_2

Рисунок 2.25 – Общая деформационно-вязкостная зависимость испытания образцов № 1 и 4

– образец № 1 является более легкоплавким по сравнению с образцом № 4;

– глубина прогиба a_o , соответствующая на кривой образцам № 1 (a_1) и 4 (a_2) на совмещённом графике совпадает по значению температурной оси параметрам вязкости образцов № 1 – b_1 и № 4 – b_2 , что соответствует общему параметру вязкости b_o ;

– при моллировании с фиксированными параметрами деформационная

кривые на участке линейного растяжения могут быть пропорционально соотнесены с кривыми температурно-вязкостных зависимостей соответствующих стекол;

– данная система соотношений деформация-температура-вязкость может быть применена для относительного измерения вязкости плоских стекол.

2.6 Разработка методики определения относительной вязкости стекла

Установленные закономерности связывающие деформационные и вязкостные параметры в процессе вакуумного моллирования плоского стекла в форму с закрепленным краем, позволяют предложить метод определения вязкости стекла относительно имеющегося аналога. Предлагаемый метод позволяет оперативно определять вязкостные параметры листового стекла без определения его химического состава. Имея аналог для сравнения, подходящий по параметрам расчету по методу Охотина, предлагаемый метод позволяет определить вязкостные характеристики плоских стекол различного состава [66,67].

Для систематизации метода использовали сравнение деформации H при постоянной нагрузке и скорости нагрева $H=f(T)$ и изменения соответствующей зависимости логарифма вязкости от температуры $lg(\eta)=f(T)$.

Определение зависимости вязкости от температуры неизвестного по составу стекла состоит из двух этапов. На первом этапе определяют деформацию эталонного образца $H_{ан}$ от температуры при фиксированной скорости нагрева и постоянном разряжении.

Графически зависимость изменения деформации представлена на рисунке 2.26.

В качестве эталонного образца использовали стекло с установленным составом, соответствующее требованиям по расчёту, температура-вязкость по методу Охотина.

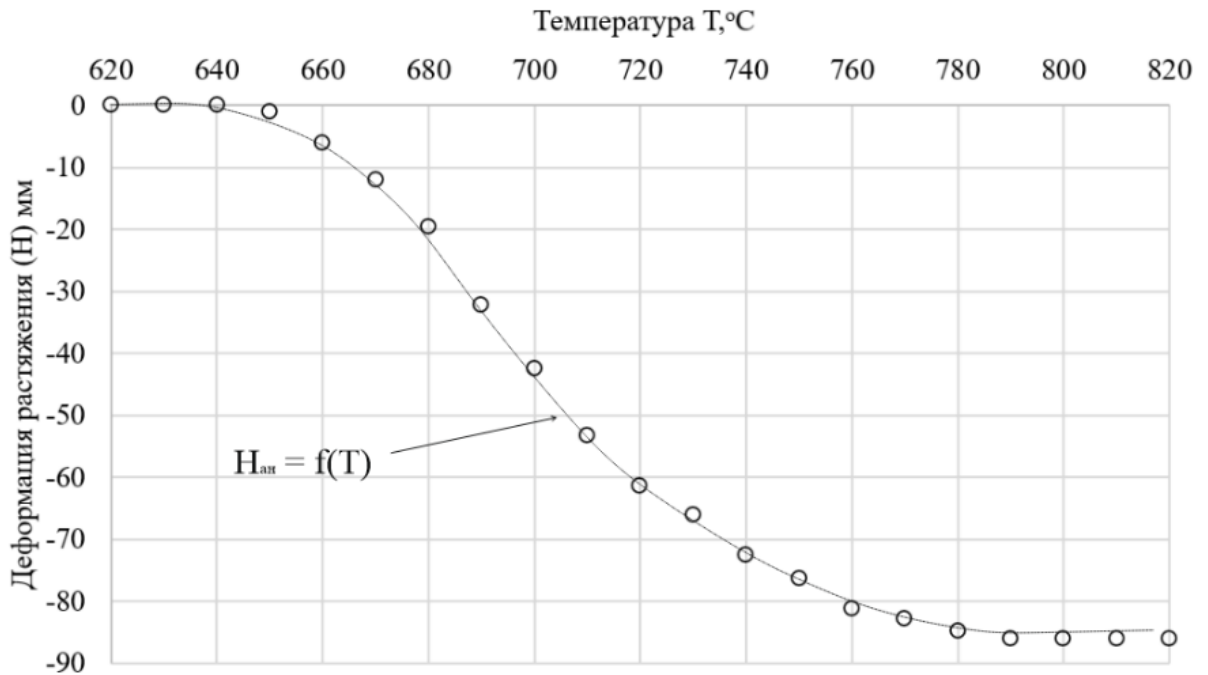


Рисунок 2.26 – Зависимость деформации образца стекла в форму от изменения температуры

Температуру T , соответствующую значению логарифма вязкости $lg(\eta_{ан})$ рассчитывают по формуле:

$$T = AP_{Na2O} + B(P_{MgO} + P_{CaO}) + CP_{Al2O3} + D, \quad (2.5)$$

где T – температура, °C;

P – содержание в стекле соответствующих оксидов в мас. %;

A, B, C и D – константы М. В. Охотина.

По значениям температура-вязкость, рассчитанным по методу Охотина, построили зависимость изменения логарифма вязкости $lg(\eta_{ан})$ от изменения температуры (T) для эталонного образца рисунок 3.7.

$$lg(\eta_{ан}) = f(T), \quad (2.6)$$

Совместили диаграммы зависимостей изменения деформации растяжения $H_{ан}$ от изменения температуры T и изменения логарифма вязкости стекла $lg(\eta_{ан})$ от изменения температуры), показанные на рисунках 2.26 и 2.27, по общей температурной оси T . Исходя из представленных совмещенных зависимостей изменения деформации растяжения стекла $H_{ан}$ от изменения температуры T и изменения логарифма вязкости $lg(\eta_{ан})$ от изменения

температуры T , определили изменение логарифма вязкости эталонного стекла $lg(\eta_{ан})$ от изменения его деформации растяжения $H_{ан}$. Показанную на рисунке 3.8 совмещенную зависимость использовали в качестве эталона для определения относительного значения логарифма вязкости $lg(\eta_{исп})$ испытуемых в дальнейшем образцов стекла.

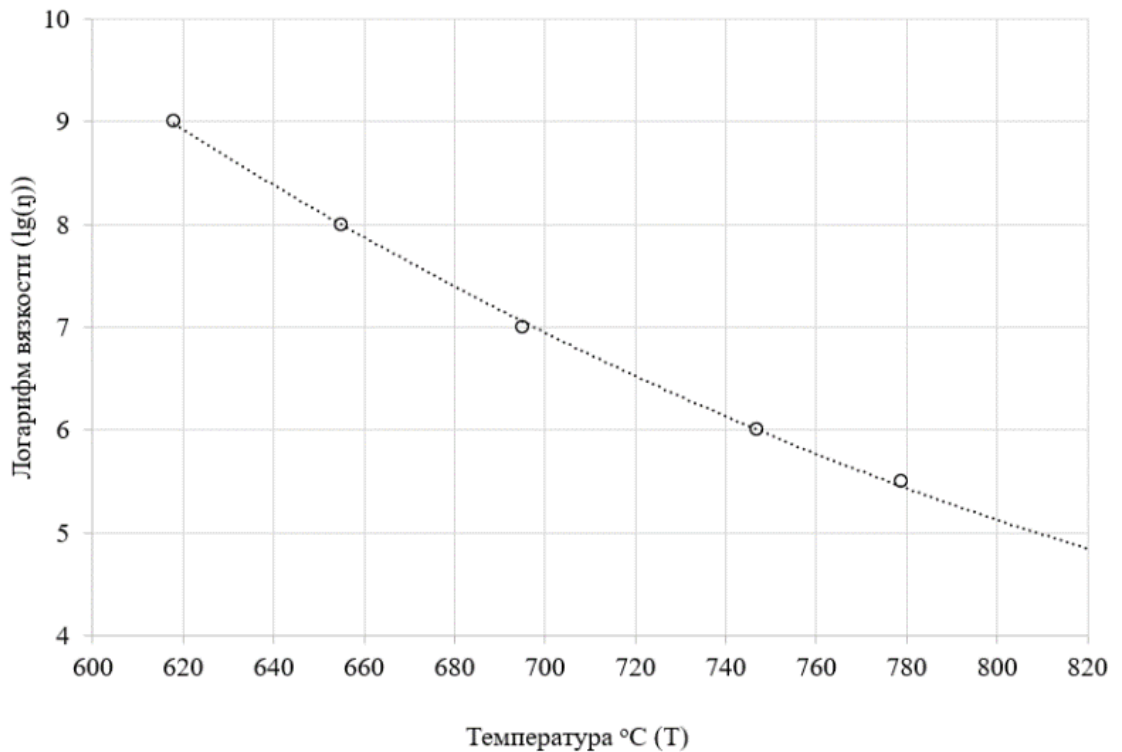


Рисунок 2.27 – Изменение логарифма вязкости $lg(\eta_{ан})$ эталонного образца от температуры

На втором этапе проводили испытание образца стекла неизвестного состава и определение зависимости логарифма вязкости стекла испытуемого образца $lg(\eta_{исп})$ относительно логарифма вязкости стекла эталонного образца $lg(\eta_{ан})$.

На основе полученных данных изменения деформации растяжения испытуемого образца $H_{исп}$ стекла и изменения температуры T в диапазоне вязкости, соответствующем $9 > lg(\eta) > 5$, строили зависимость изменения деформации растяжения эталонного образца $H_{исп}$ от изменения температуры T

$$H_{исп} = f(T), \quad (2.7)$$

которую накладывали на построенную ранее зависимость изменения деформации растяжения $H_{ан}$ от изменения температуры T эталонного образца стекла, совмещая по общей температурной оси T для сравнения.

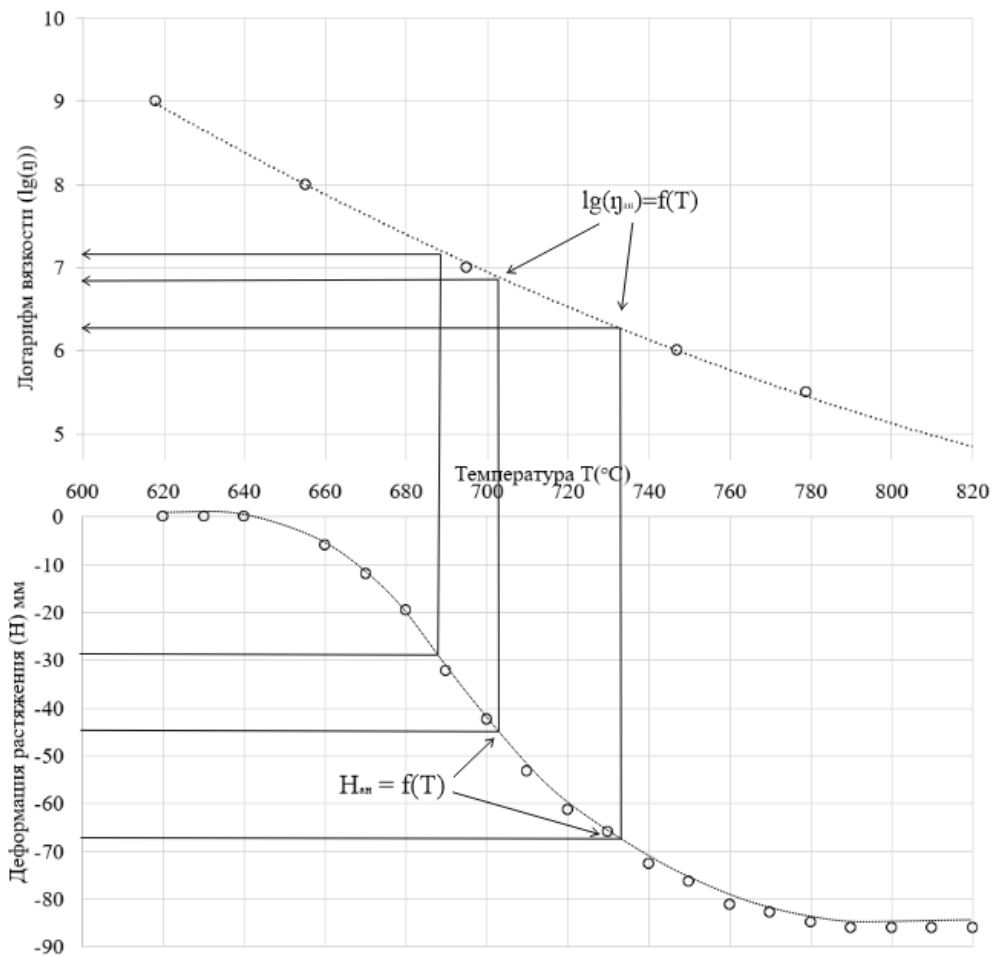


Рисунок 2.28 – Совмещенные графики зависимостей изменения деформации и логарифма вязкости от изменения температуры

Представленные на рисунке 2.29 графики совмещенных зависимостей сравнивали по отклонению значений температур эталонного $T_{ан}$ и испытуемого $T_{исп}$ образцов стекла при условии равенства значений деформации растяжения испытуемого $H_{исп}$ и эталонного $H_{ан}$ образца стекла $T_{ан} \neq T_{исп}$ при $H_{исп} = H_{ан}$

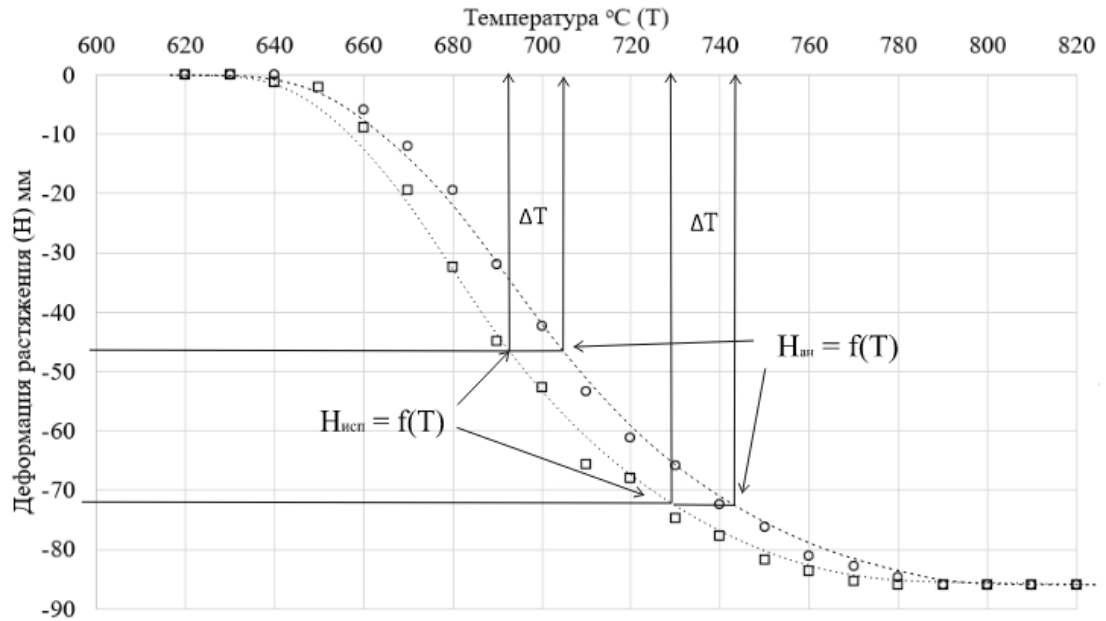


Рисунок 2.29 – Совмещенные зависимости изменения деформации эталонного и испытуемого образцов

Из совмещенных зависимостей испытуемого $H_{исп}$ и эталонного $H_{ан}$ образца стекла определяли отклонение температур ΔT

$$\Delta T = T_{исп} - T_{ан}, \quad (2.8)$$

Для построения точечной зависимости изменения логарифма вязкости испытуемого образца стекла $lg(\eta_{исп})$ от изменения температуры $T_{исп}$

$$Lg(\eta_{исп}) = f(T_{исп}), \quad (2.9)$$

значения логарифма вязкости $lg(\eta_{исп})$ определяли как

$$lg(\eta_{исп}) = lg(\eta_{ан}), \quad (2.10)$$

а значение температуры $T_{исп}$ определяли как

$$T_{исп} = T_{ан} + \Delta T, \quad (2.11)$$

По полученной зависимости определяли скорректированную рабочую температуру $(T_{исп})_{раб}$ при условии совпадения рабочих значений логарифма вязкости эталонного $lg(\eta_{ан})_{раб}$ и испытуемого $lg(\eta_{исп})_{раб}$ образца показанного на рисунке 2.30

$$Lg(\eta_{ан})_{раб} = lg(\eta_{исп})_{раб}, \quad (2.12)$$

Особенность данного метода состоит в его оперативности, что позволяет проводить входной контроль листового стекла на предприятии, занимающемся моллированием плоского стекла.

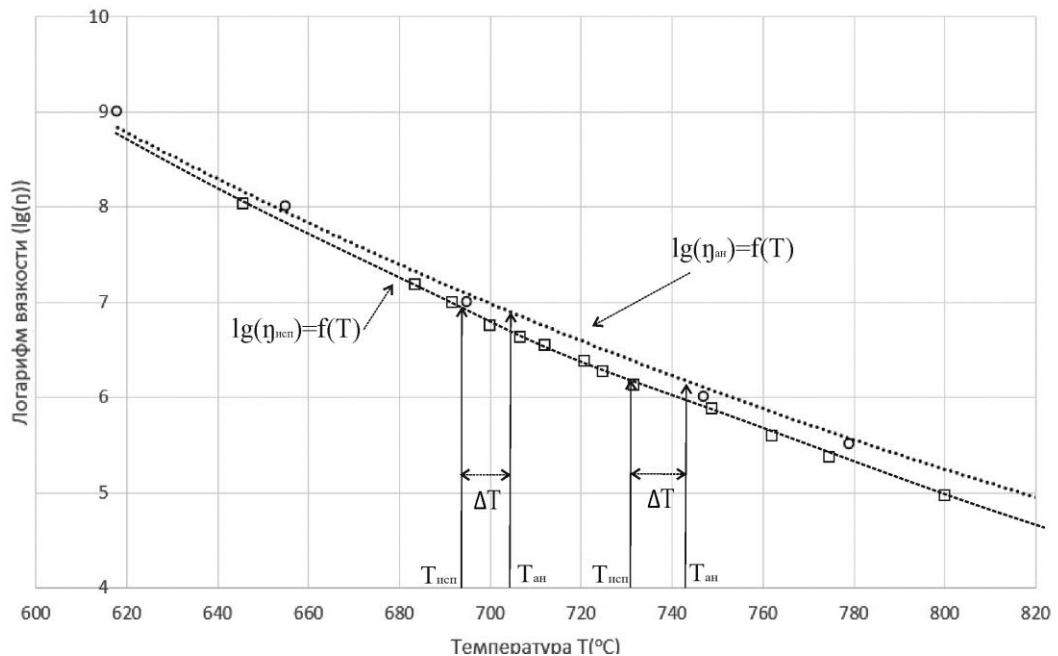


Рисунок 2.30 – Построение отклонения зависимости логарифма вязкости испытуемого стекла $\lg(\eta_{исп})$ от эталонного $\lg(\eta_{ан})$

На способ «Способ определения вязкости стекла» был получен патент № 2796330 [71] представленный в приложении В на рисунке В.3, что подтверждает новизну результатов исследования.

Выводы по главе 2

В ходе проведенного исследования было выявлено:

- был предложен способ вакуумного моллирования плоского стекла в вакуумную форму с закреплённым краем, на который получен патент на изобретение [63];
- изменение толщины стекла при моллировании зависит от типа используемой формы. При этом линейная зависимость изменения толщины

наблюдается только при моллировании плоского стекла в конусную форму с углом при вершине 60° .

- было установлено, что процесс изменения толщины плоского стекла при моллировании его в вакуумную форму с закрепленным краем начинается с образования сферического сегмента, обусловленного атмосферным давлением, глубина которого определяется по касательным, лежащим на гранях формы, в отличие от параболического сегмента при обычном гравитационном моллировании;

- были определены технологические зависимости давления, температуры и времени при вакуумном моллировании в конусную форму. А также отработаны режимы моллирования плоского стекла;

- определены оптимальные соотношения давление-температура для процесса моллирования и рассчитана функциональная взаимозависимость температуры и давления.

- был предложен способ определения вязкости стекла относительно имеющегося аналога, который позволяет проводить оперативный контроль вязкости плоских стекол без длительной подготовки образцов и без определения его химического состава. Имея аналог для сравнения, подходящий по параметрам расчету по методу Охотина, предлагаемый метод позволяет определить вязкостные характеристики плоских стекол различного состава;

- было установлено, что составы современных листовых стекол существенно отличаются друг от друга, даже при условии соответствия ГОСТ 111-2014, что приводит к различию физических свойств при моллировании;

- было определено, что разница температур при моллировании стекол при одних и тех же условиях может достигать $10 - 15^\circ\text{C}$, что имеет существенное значение при плоском моллировании, особенно в процессах, связанных с автоматическими операциями;

- было установлено, что деформационные-температурные параметры моллирования стекла могут быть соотнесены с температурно-вязкостными

параметрами по общей температурной оси, что позволяет связать деформацию и вязкость, как взаимосвязанные факторы;

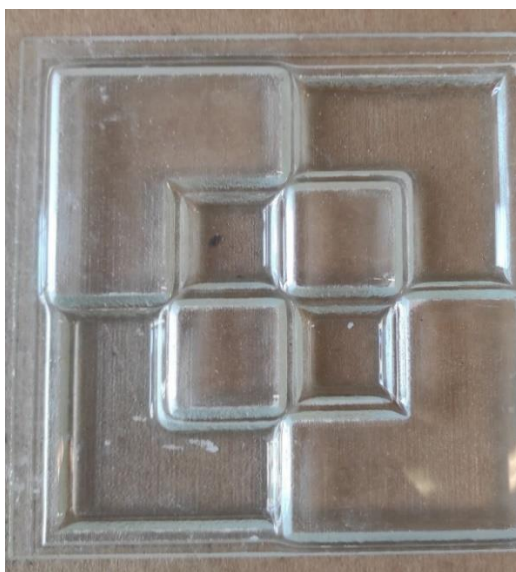
– были уточнены коэффициенты расчета вязкости по методу Охотина, позволяющие оперировать этим способом для участка зависимости температура-вязкость в интервале $10^6 - 10^9$ П без построения полной температурной зависимости.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОЙ АБРАЗИВНОГО ШЛИФОВАНИЯ СТЕКЛЯННЫХ РЕЛЬЕФОВ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В данной главе отражены исследования процесса вибрационного абразивного шлифования стеклянных рельефов с несимметричной поверхностью для выявления зависимости светопропускания стекла от технологических параметров шлифования.

Необходимость данного исследования была обусловлена требованием освещения поверхности стекол, моллируемых в вакуумную форму по методике, разработанной в данной работе и представленной в [60] приложении В на рисунке В.1, так как технология предполагает контактный способ моллирования, т.е. в результате вакуумирования поверхность стекла полностью повторяет не только рельеф, но и фактуру поверхности [72]. На рисунке 3.1 приведены примеры объектов, полученных вакуумным моллированием в форму с закрепленным краем.

*а**б*



6



2



8

a – копия элемента ограды Летнего сада (оригинал литье, металл); *б* – копия медали, посвященная 100-летию Бородинского сражения (оригинал металл, гравировка); *в* – элемент стеклоблока, облегченный вариант; *г* – копия панно «выезд Апполона» (оригинал металл, гальваника)

Рисунок 3.1 – Изделия, выполненные в технике моллирования листового стекла в вакуумную форму с закрепленным краем

3.1 Разработка метода вибрационного шлифования

В качестве исследуемого выбран объект, представленный на рисунке 3.2, который представляет из себя сложную несимметричную, розетку, изготовленную способом моллирования стекла в вакуумную форму с закрепленным краем [63].



Рисунок 3.2 – Объект исследования

Состав материала – стекло, соответствующее образцу № 1 по данным таблицы 1.1.

Геометрические размеры исследуемого образца:

- диаметр 117 мм;
- высота 18 мм;
- площадь рельефной поверхности 26240 мм².

Коэффициент относительного светопропускания 68 ± 1 %.

Геометрические параметры исследуемого объекта получены с использованием оптического 3Д сканера, характеристики которого представлены в приложении А на рисунке А.5 и в таблице А.9, а коэффициент светопропускания определен с помощью спектрофотометра, характеристики которого соответствуют [73] и представлены в приложении А на рисунке А.6. и в таблицах А.10, А.11.

В качестве понятия «коэффициента относительного светопропускания» введем отношение:

$$T_{отн} = \Phi_{\tau_{mat}} / \Phi_{\tau_{исх}}, \quad (3.1)$$

где $\Phi_{\tau_{mat}}$ – проходящий световой поток через моллированный образец стекла;

$\Phi_{\tau_{исх}}$ – проходящий световой поток через исходный образец стекла.

Данное допущение было принято, исходя из того факта, что при моллировании стекла рассматриваемым способом, происходит изменение толщины стекла, что влияет на абсолютные значения проходящих световых потоков. При испытании исходных образцов стекла на светопропускание коэффициент абсолютного светопропускания находился в диапазоне 87-90 %.

Данные, представленные в таблице 3.1, не могут быть коррелированы между собой, но коррелируются относительно светопропускания моллированного и не моллированного состояния. В таблице 3.2. приведены средние относительные значения светопропускания для каждого типа образцов.

Таблица 3.1 – Исходное значение проходящего светового потока для образцов, указанных в таблице 1.1.

Образец	Исходное значение проходящего светового потока, %
1	90
2	90
3	89
4	87
5	88
6	91
7	89

В качестве материала для обработки поверхности использовали абразивный карбид-кремневый порошок, ГОСТ 52381-2005 [74], фракции F60, F120, F220 (черный), F400, F600, F1200 (зеленый), твердость по Моосу 9,1.

Таблица 3.2 – Значение относительного коэффициента светопропускания для исследуемых образцов

Образец	Исходное значение проходящего светового потока, %	Значение проходящего потока после моллирования, %	Относительный коэффициент светового потока
1	90	61	0,68
2	90	62	0,69
3	89	60	0,67
4	87	60	0,69
5	88	61	0,69
6	91	62	0,68
7	89	60	0,67

Свойства абразивного материала приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Свойства абразивного материала, используемого в исследовании

Фракция	Фракционный состав, мкм	Твердость по Моосу	Цвет
F60	315-250	0,91 – 0,95	черный
F120	125-100	0,91 – 0,95	черный
F220	63-50	0,91 – 0,95	черный
F400	20-14	0,91 – 0,95	зеленый
F600	10-7	0,91 – 0,95	зеленый
F1200	3-2	0,91 – 0,95	зеленый

В качестве связующего для изготовления абразивного инструмента применялась полиуретановая композиция горячего отверждения марки СУРЭЛ ТС-2К-60А. Характеристики материала представлены в таблице 3.4 [75].

СУРЭЛ ТС-2К-60А – композиция горячего отверждения на основе ТДИ-терминированного сложноэфирного преполимера и отвердителя, предназначена для производства литевых эластомеров твердостью А 60 по Шору. Эластомер отличается высокими прочностными характеристиками, эластичностью и износостойкостью.

Таблица 3.4 – Характеристики полиуретановой композиции, используемые в исследовании

Параметр	Значение
Твердость по Шору А	60
Напряжение при 100% удлинении, МПа	2.5
Напряжение при 300% удлинении МПа	5.3
Предел прочности при растяжении МПа	50
Относительное удлинение при разрыве, %	558
Сопротивление раздиру, кН/м	46
Относительная остаточная деформация сжатия, %	13

В связи со сложностью объективного контроля светопропускания рельефных стекол, связанную с требованием перпендикулярного падения света на исследуемую поверхность, было проведено моделирование рельефной несимметричной стеклянной поверхности. Наиболее сложным в определении параметров несимметричных рельефных поверхностей является фактическое определение площади обрабатываемой поверхности.

Для определения фактической площади обрабатываемой поверхности использовали метод оптического активного 3Д сканирования объекта. В качестве инструмента для исследования использовался сканер RangeVision NEO, параметры которого указаны в приложении А на рисунке А.5 и в таблице А.9.

Процесс сканирования объекта, показанного на рисунке 3.2. показан на рисунке 3.3.

В таблице 3.5. показаны параметры 3Д модели, используемые для дальнейшего анализа. Анализ поверхности модели был проведен с использованием программы 3Д моделирования свободного доступа, «Blender» [76].

простых 3Д моделей.

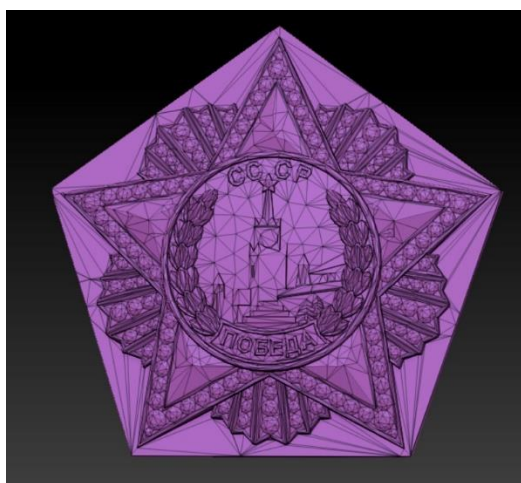
На рисунке 3.4. показаны триангуляционные 3Д модели сравниваемых объектов, в таблице 3.6 представлены их исследуемые параметры.

Таблица 3.6 – Геометрические параметры анализируемых рельефов

Рельеф рисунок 4.6.	Площадь рельефной поверхности, см ²	Площадь проекции рельефной поверхности, см ²
а	420,36	331,24
б	380,15	335,65

Общие свойства исследуемых 3Д поверхностей выражаются в следующем:

– обе поверхности содержат состоят из полигонов, составляющих 3Д модель, а их общая площадь равняется площади поверхности соответствующего рельефа.



а



б

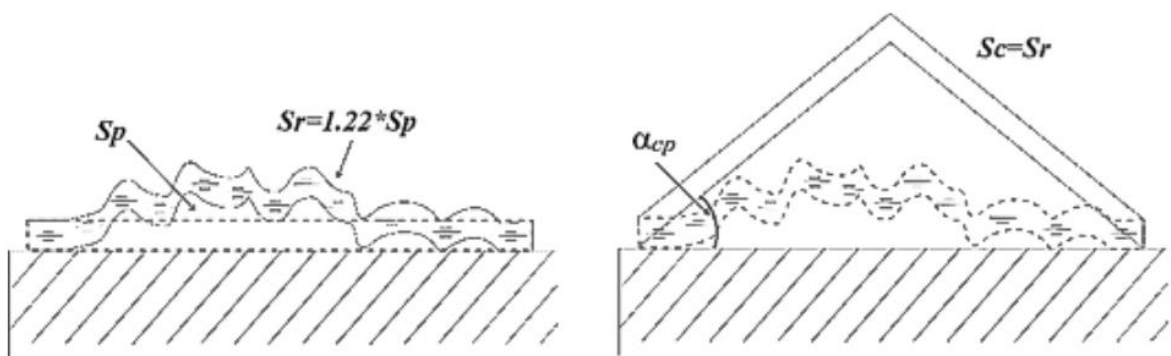
Рисунок 3.4 – Сканированные рельефные поверхности

– каждый полигон модели имеет проекцию, сумма которых составляет общую площадь проекции рельефной поверхности.

– плоскость каждого полигона 3Д модели рельефа и соответствующая ему плоскость проекции находятся под углами в диапазоне 0 – 90°.

Исходя из представленных наблюдений рассмотрим угол между полигоном и его проекцией, как фактор, так или иначе, обобщающий все рельефные поверхности. Для подтверждения этого высказывания введем понятия «среднего угла рельефной поверхности» и «упорядочивание рельефной поверхности». Для его визуального восприятия рассмотрим рисунок 3.5.

Произвольный рельеф площадью S_r имеет соответствующую площадь проекции S_p . Представим площадь поверхности S_r как соответствующую боковую площадь S_c конуса основание которого описывает площадь проекции рельефа S_p . Угол при основании конуса α_{cp} определим как среднее значение среди всех углов между полигонами и их проекциями на плоскость. Этот угол определим как «средний угол рельефной поверхности», который характеризует среднее значение углов всех полигонов рельефной поверхности к их проекциям на плоскость [77].



S_p – площадь плоского исходного листа стекла; S_r – площадь поверхности рельефа; S_c – площадь боковой поверхности конуса; α_{cp} – средний угол рельефной поверхности

Рисунок 3.5 – Моделирование визуального представления «среднего угла рельефной поверхности»

Косинус среднего угла рельефной поверхности угла можно определить как:

$$\cos \alpha_{cp} = R / L, \quad (3.2)$$

где R – радиус окружности, описывающей фигуру проекции рельефа;

L – образующая боковой поверхности конуса или же после преобразования выражений:

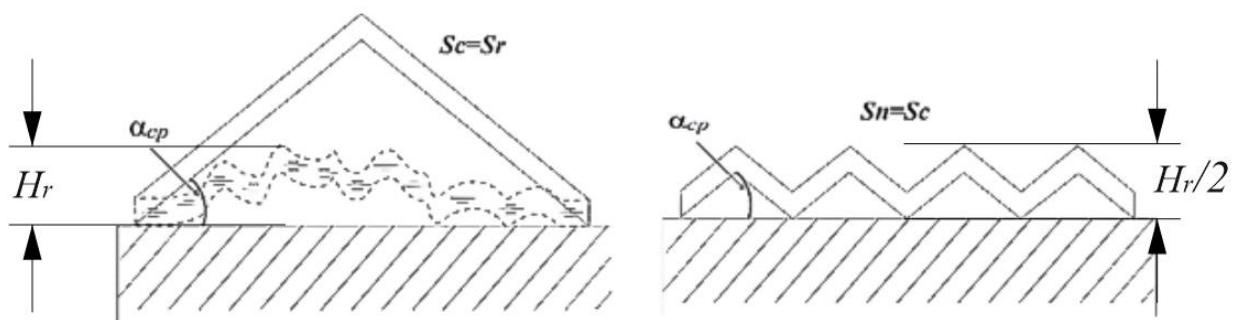
$$S_c = S_r = \pi \cdot R \cdot L, \quad (3.3)$$

$$S_p = \pi \cdot R^2, \quad (3.4)$$

$$\cos \alpha_{cp} = S_p / S_r \text{ или } \alpha_{cp} = \arccos (S_p / S_r)$$

Исходя из представленных преобразований, «средний угол рельефной поверхности» определим как арккосинус отношения площади окружности, описанной вокруг проекции рельефа к фактической площади рельефной поверхности.

Для определения понятия «упорядоченный рельефный объект» рассмотрим рисунок 3.6.



S_r – площадь поверхности рельефа; S_c – площадь боковой поверхности конуса;
 S_n – площадь поверхности упорядоченного рельефа; α_{cp} – средний угол рельефной поверхности; H_r – максимальная высота рельефной поверхности
 Рисунок 3.6 – Модель визуального представления «упорядоченной рельефной поверхности»

Анализируя данные, представленные на рисунке 3.6 можно дать определение «упорядоченной рельефной поверхности» как рельеф состоящий из упорядоченных конусов или пирамид с углов при основании α_{cp} , высотой равной $H_r/2$ от максимального значения исходного рельефа и площадью равной S_r площади поверхности исходного рельефа [77].

Анализируя данные, представленные таблицы 3.6, а также рассмотренные выше определения рассчитаем средний угол рельефной поверхности 3Д моделей, представленных на рисунке 3.4

$$\alpha_{cp(a)} = \arccos (331,24/420,36) = 38^{\circ}, \quad (3.5)$$

$$\alpha_{cp(b)} = \arccos (335,65/380,15) = 28^{\circ}, \quad (3.6)$$

Понятие среднего угла рельефной поверхности имеет практическое значение, которое выражается:

- в определении линии, являющейся нормалью в среднему полиному триангуляционной модели;
- в объективной оценке максимально эффективного угла обзора (освещения) рельефа;
- в объективной оценке расположения точечного освещения рельефных поверхностей на выставках, для наиболее эффективного освещения рельефа.
- в определении параметров механической шлифовки асимметричных рельефных поверхностей.

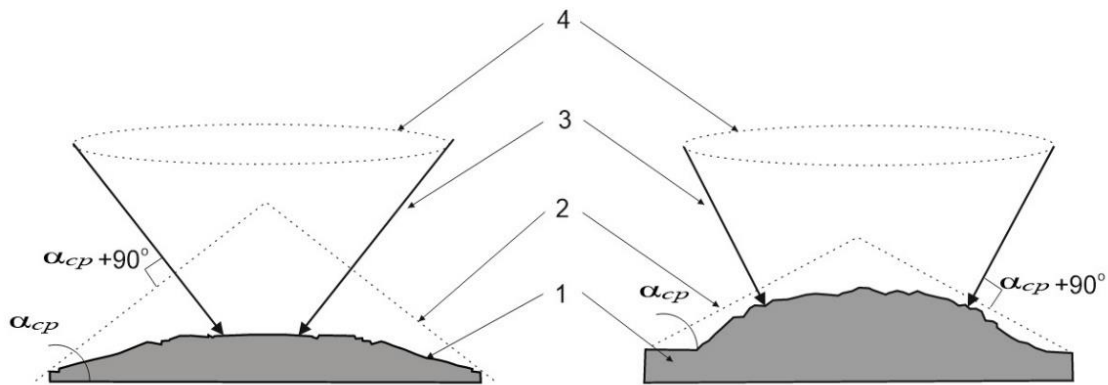
На рисунке 3.7 показано визуальное представление использования среднего угла рельефной поверхности.

Для рассматриваемого нами как исследуемого объекта, показанного на рисунке 3.2, согласно рассмотренным ранее допущениям, средний угол рельефной поверхности составляет 35° .

Несимметричность рельефной поверхности ограничивает нас в выборе способов механического шлифования поверхности. Наиболее подходящим является способ вибрационного шлифования. Для его осуществления в рамках проводимого исследования необходимо решить следующие задачи:

- создание индивидуального инструмента для вибрационного шлифования несимметричной рельефной поверхности;
- создание стенда для моделирования процесса вибрационного шлифования несимметричного стеклянного рельефа;
- отработка технологических приемов шлифования стекла на стенде;
- определение математических зависимостей светопропускания от параметров процесса вибрационного шлифования несимметричной рельефной стеклянной поверхности;

– составление рекомендаций по использованию метода вибрационного шлифования несимметричных рельефных стеклянных поверхностей.



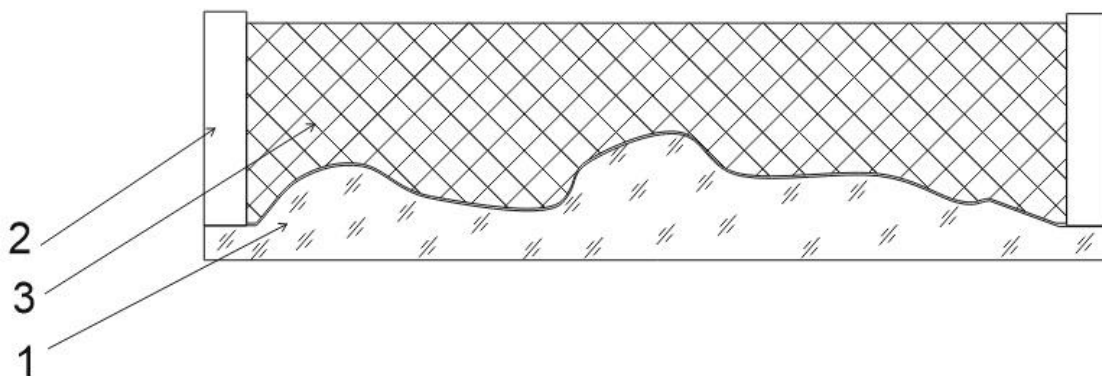
1 – осматриваемая рельефная поверхность; 2 – моделированный профиль рельефа; 3 – эффективное направление обзора поверхности; 4 – эффективный конус обзора поверхности; α_{cp} – средний угол рельефной поверхности
Рисунок 3.7 – Визуальное представление эффективного угла обзора рельефа:

Для оценки влияния процесса шлифования на обрабатываемую поверхность был изготовлен инструмент, как показано на рисунке 3.8.

Рельефную стеклянную поверхность 1 укладывают горизонтально. Обрабатываемую рельефную стеклянную поверхность ограничивают бортиками 2 высотой, превышающей максимальную точку рельефа, не менее чем на 3 – 5 см. Далее полиуретановую смолу с твердостью А 60 по Шору смешивают с выбранным абразивным порошком в соотношении 3:1.

В качестве абразива, для создания рабочей поверхности шлифовального инструмента, использовали порошки карбида кремния фракцией от 10 до 160 мкм, как показано в таблице 3.3. Суспензию полиуретановой смолы и абразивного порошка выдерживали в течение 10 – 15 мин для седиментации порошка на границе рельефной стеклянной поверхности. Его относительная концентрация по высоте заливки изменяется, как показано на рисунке 3.9.

Распределение концентрации частиц N представлено по относительной толщине формируемого шлифовального инструмента L %.



1 – обрабатываемый рельеф; 2 – опалубка для заливки композиции полимер-абразив; 3 – полимер абразивная композиция

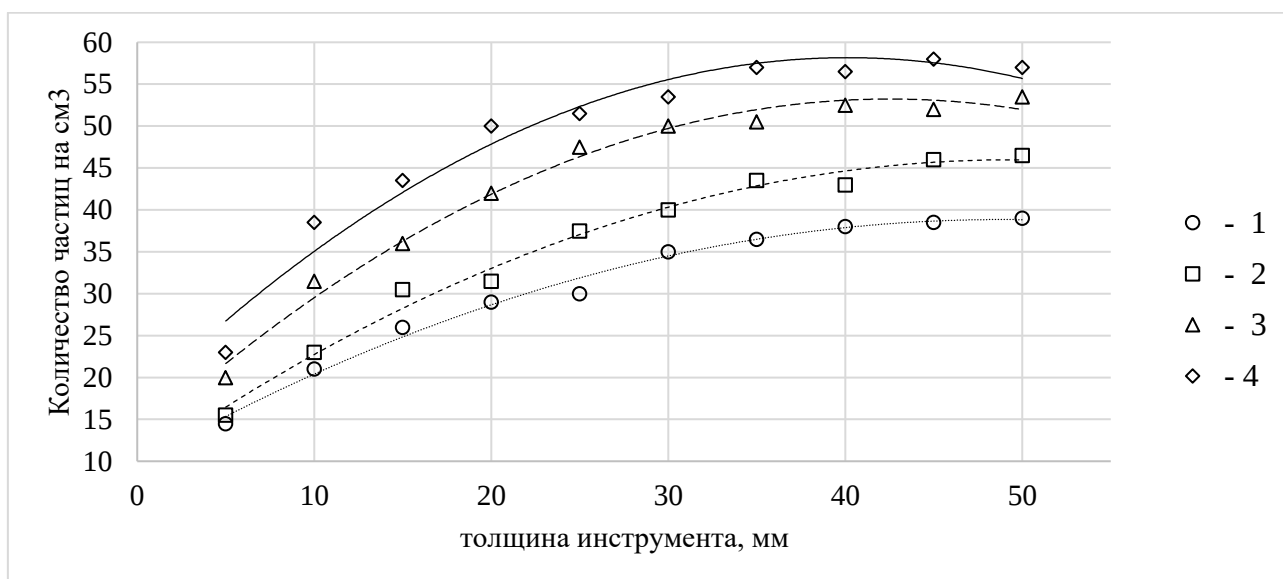
Рисунок 3.8 – Схема изготовления шлифовального инструмента

Полученный таким образом абразивный слой равномерно распределен по границе рельефной стеклянной поверхности, причем максимальное значение концентрации частиц приходится на границу контакта шлифовальный инструмент – рельефная стеклянная поверхность.

Затем форму, ограниченную бортиками с залитой смолой, нагревают до температуры не менее $45 - 50^{\circ}\text{C}$ и выдерживают при этой температуре 10 – 12 минут. Далее форму охлаждают до температуры $20 - 25^{\circ}\text{C}$, бортики, ограничивающие форму, удаляют, а шлифовальный инструмент с абразивной шлифовальной поверхностью снимают с формируемой рельефной стеклянной поверхности. Экспериментальные данные изменения концентрации абразивных частиц по толщине инструмента представлены в приложении Б таблица Б.11.

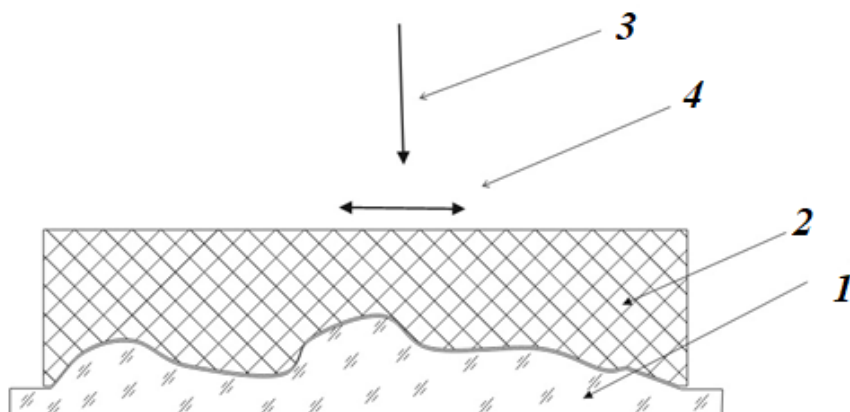
Для проведения эксперимента изготовили по вышеизложенной методике четыре инструмента с соответствующей фракцией абразива.

На рисунке 3.10 показана схема установки вибрационной механической обработки стеклянной рельефной поверхности.



Фракция: 1 – 10-40; 2 – 40-80; 3 – 80-120; 4 – 120-160 мкм

Рисунок 3.9 – Распределение концентрации абразивных частиц карбида кремния по высоте инструмента



1 – обрабатываемый стеклянный образец; 2 – шлифовальный инструмент;
3 – направление усилия, прилагаемого к инструменту; 4 – вибрационное усилие

Рисунок 3.10 – Схема установки вибрационной механической обработки стеклянной рельефной поверхности

Для подтверждения метода вибрационного шлифования на рисунке 3.11 представлен пример обработки рельефной поверхности изготовленным шлифовальным инструментом.

Данный пример показывает, что предложенная методика вибрационного шлифования является научно обоснованной и на базе ее было получен патент

[78] представленный в приложении В на рисунке В.3, и в дальнейшем проработанная в работе [79].



Рисунок 3.11 – Пример обработки стеклянного рельефа шлифовальным инструментом, изготовленным по методике разработанной выше

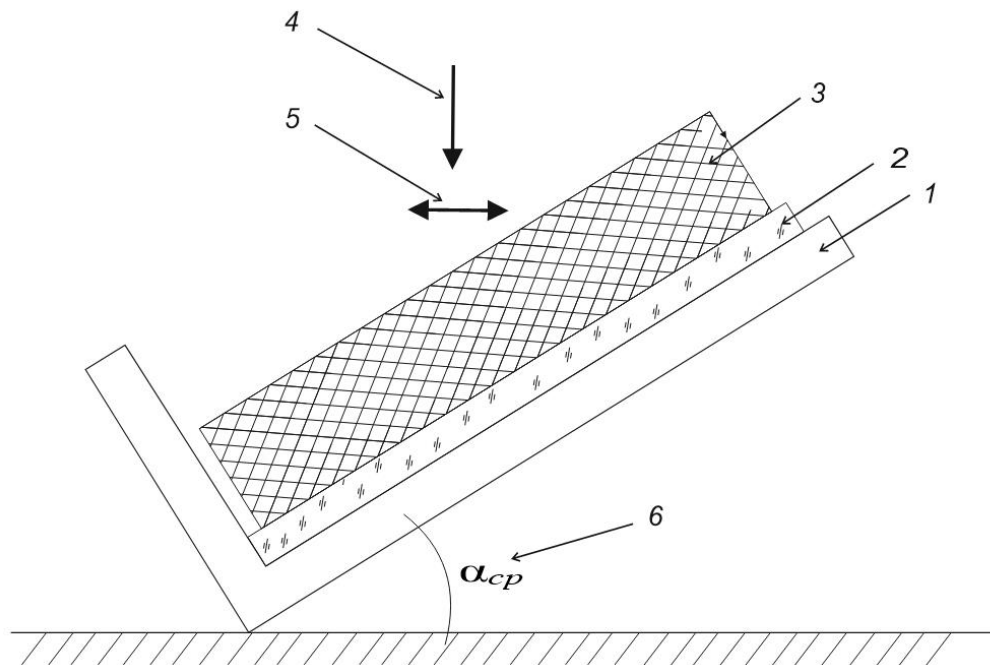
Но для определения зависимости светопропускания от параметров механической обработки непосредственное использование данного метода недостаточно. В первую очередь это объясняется тем, что при вакуумном моллировании стекла методом, предложенным в [63] и представленном в приложение А, на рисунке А.7, происходит измерение толщины стекла, что значительно влияет на коэффициент светопропускания исследуемого объекта. Кроме того, изменение рельефа поверхности стекла после моллирования так же вносит погрешности при определении функциональных зависимостей светопропускания от параметров механической обработки.

На рисунке 3.12 представлена модель стенда для исследования изменения светопропускания от параметров вибрационной механической обработки.

Базовая суть исследования на представленном стенде состоит в следующем:

- поворотный стол 1 устанавливается под углом равным среднему углу рельефной поверхности 6;

- на установленный под углом стол укладывается образец плоского стекла со степенью светопропускания равной исследуемому образцу;
- образец стекла по очереди обрабатывается шлифовальным инструментом с различным зерном при этом фиксируются технологические параметры обработки (усилие, время, вибрационные параметры);
- между каждым циклом обработки определяются параметры светопропускания стекла на каждом этапе обработки;
- определяется значение светопропускания от параметров шлифования и строится функциональная зависимость этих факторов.



1 – поворотный стол; 2 – обрабатываемый образец стекла; 3 – шлифовальный инструмент; 4 – направление усилия, прилагаемого к инструменту; 5 – вибрационное усилие; 6 – средний угол исследуемого рельефа

Рисунок 3.12 – Схема станка для исследования изменения светопропускания от параметров вибрационной механической обработки

3.2. Определение оптимальных технологических параметров вибрационного шлифования

Для понимания особенностей механического шлифования несимметричной рельефной стеклянной поверхности необходимо выделить

технологические факторы, влияющие на процесс вибрационного шлифования и рассмотреть влияние этих факторов на изменение светопропускания стела. К ним можно отнести:

- усилие, прилагаемое к инструменту, при шлифовании;
- характеристики вибрационного воздействия на инструмент (амплитуда колебания, частота);
- время обработки между замерами светопропускания;
- изменение среднего угла рельефа;
- влияние фракции абразивного зерна на процесс шлифования.

Для исследования влияния каждого фактора на процесс шлифования были выбраны средние и граничные значения воздействия на материал, обусловленные как спецификой обрабатываемого материала, так и доступными параметрами рабочего инструмента, показанными в таблице 3.7.

Исследования проводились с фиксацией среднего значений параметров и исследованием изменения светопропускания при изменении в граничных условиях одного из параметров. В качестве исходного значения светопропускания моллированного стекла был взято среднее значение из таблицы 3.3 – 61 %.

На рисунке 3.13. представлена зависимость изменения светопропускания от прилагаемого усилия в диапазоне 20 – 30 Н при фиксации остальных технологических параметров в среднем значении.

Результаты исследования, представленные на рисунке 3.13 показали, что увеличение светопропускания в исследуемом диапазоне механического усилия на шлифующий инструмент, происходит незначительно, в пределах 3 %, что при среднем значении 68,5% практически полностью попадает в зону погрешности спектрофотометра, параметры которого показаны в приложении А на рисунке А.6. таблицах А.10, А.11

Экспериментальные данные светопропускания от параметров воздействия на образец представлены в приложении Б таблицы Б.12–Б.15.

Таблица 3.7 – Технологические параметры воздействия

Технологическое воздействие	Среднее значение	Граничные значения
Прилагаемое усилие, Н	25 $\pm$ 1	20 – 30
Характеристики вибрации: S – амплитуда колебания, мм, f – частота, Гц	0,7 10	0,5 – 1,0 5 – 20
Время обработки одного цикла между замерами светопропускания, с.	100	10 – 200
Абразивное зерно инструмента. Мкм	120–160	10–160;
Средний угол рельефа	35	0 – 90

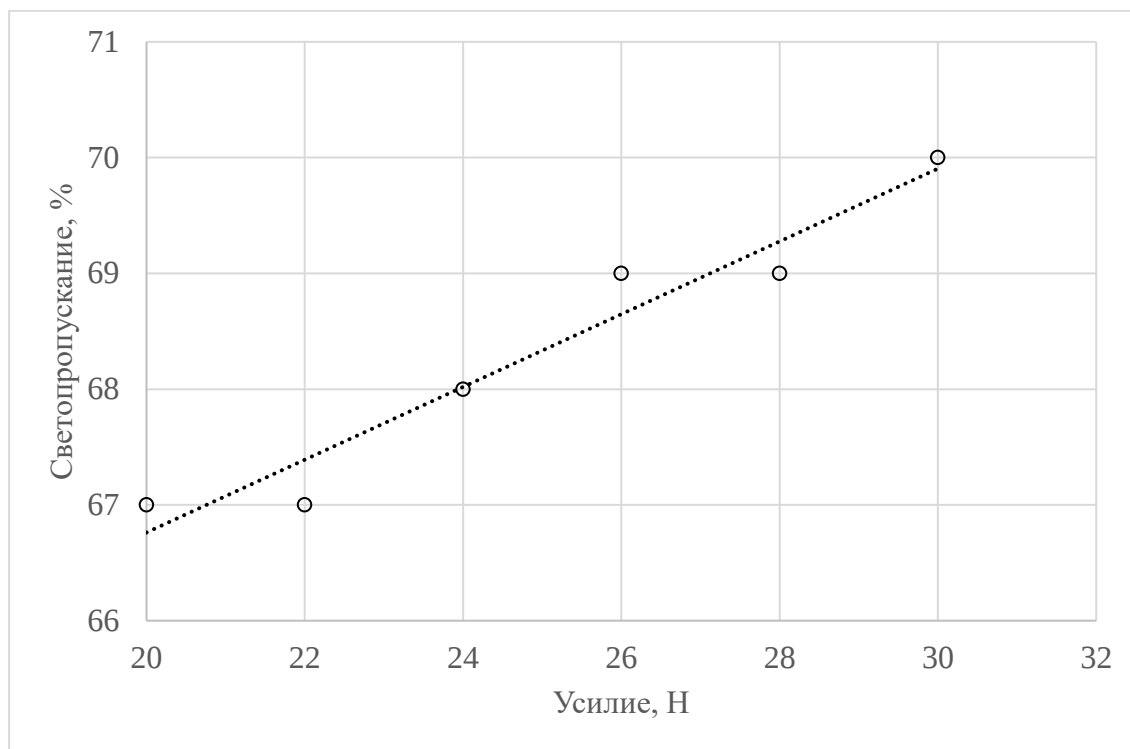


Рисунок 3.13 – Изменение светопропускания образца от изменения прилагаемого усилия

Для дальнейшего исследования среднее значение прилагаемого усилия на шлифующий инструмент принимаем как 26 ± 1 Н.

На рисунке 3.14 представлена зависимость изменения светопропускания от амплитуды вибрации в диапазоне 0,5 – 1,0 мм при фиксации остальных

технологических параметров в среднем значении.

Исходя из данных, представленных на рисунке 3.14, видно, что зависимость светопропускания от амплитуды колебания шлифовального инструмента плохо коррелируема, а данные изменения в исследуемом диапазоне так же укладываются в диапазон погрешности спектрофотометра.

Для дальнейшего исследования в качестве значение амплитуды колебания принимаем как 0,8 мм.

На рисунке 3.15 представлена зависимость изменения светопропускания от амплитуды вибрации в диапазоне 0,5 – 20 Гц при фиксации остальных технологических параметров в среднем значении.

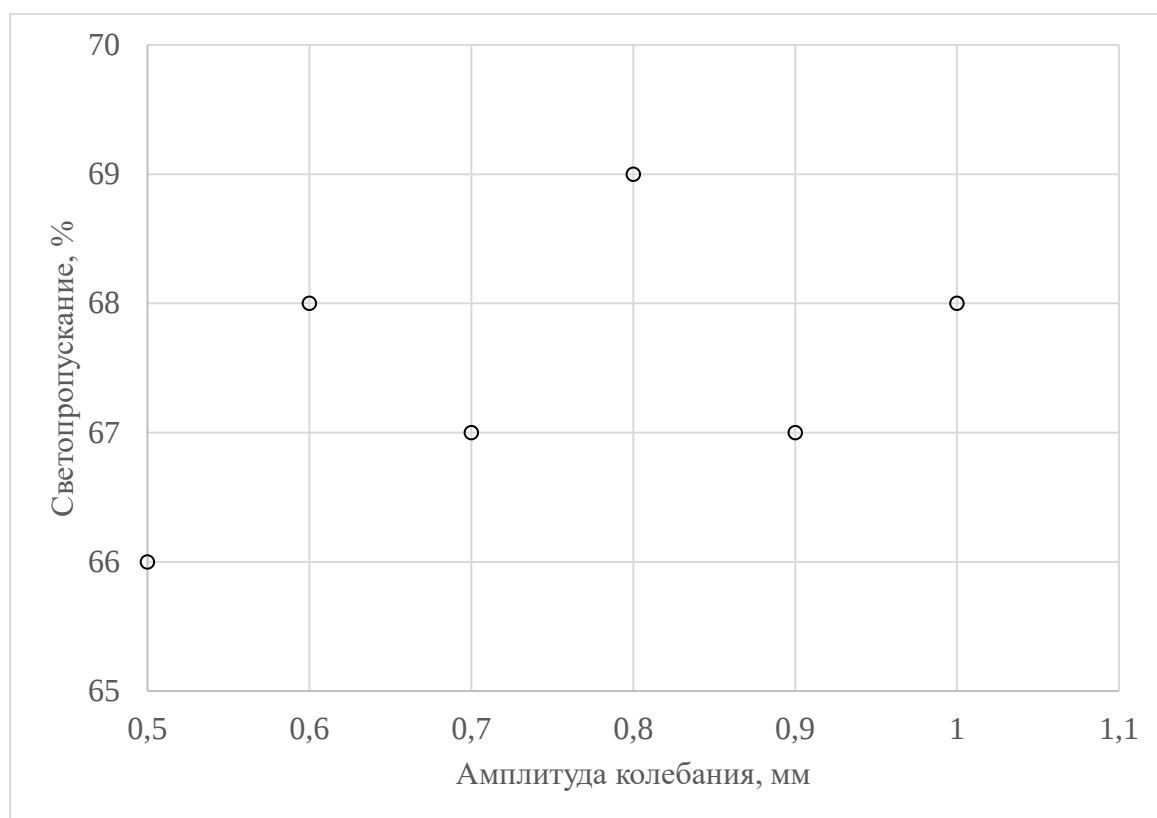


Рисунок 3.14 – Изменение светопропускания образца от изменения амплитуды вибрации

Как видно из данных, представленных на рисунке 3.15, изменение светопропускания стеклянного образца от частоты вибрации шлифовального инструмента в исследуемом интервале носит логарифмическую зависимость,

которую можно интерпретировать, как увеличение светопропускания с увеличением частоты колебания инструмента. Но при увеличении частоты колебания инструмента более 10 Гц, происходит нагрев как шлифовального инструмента, так и обрабатываемого стеклянного образца. Это требует увеличение потока охлаждающей жидкости между инструментом и поверхностью, что вносит дополнительный фактор неопределенности и значительно усложняет проводимое исследование.

Исходя из этого соображения, для дальнейшего исследования в качестве оптимального значения принимаем частоту вибрации шлифующего инструмента 10 Гц.

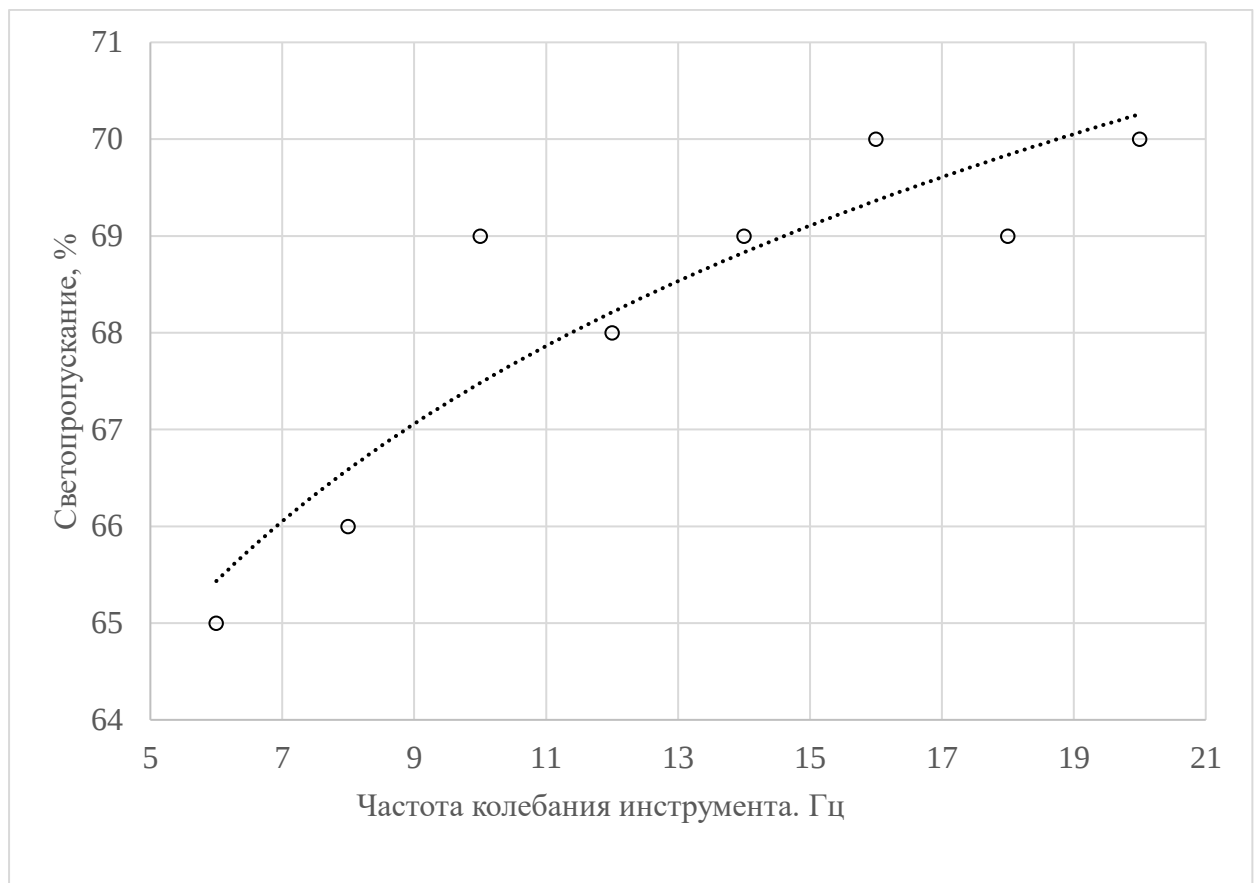


Рисунок 3.15 – Изменение светопропускания образца от изменения частоты вибрации шлифующего инструмента

На рисунке 3.16 представлена зависимость изменения светопропускания от длительности воздействия шлифовального инструмента на исследуемый

образец в диапазоне 0 – 200 с, при фиксации остальных технологических параметров в среднем значении.

Как показали результаты исследования, представленные на рисунке 3.16, зависимость изменение светопропускания от изменения времени шлифования носит коррелируемый характер и, на исследуемом интервале, может быть выражена полиномиальной кривой. Эта зависимость достигает своего практического максимума при времени обработки в 120 с и при дальнейшем воздействии на образец практически не меняет своего значения. Исходя из этого оптимальное время обработки материала выбираем как 120 с или 2 мин.

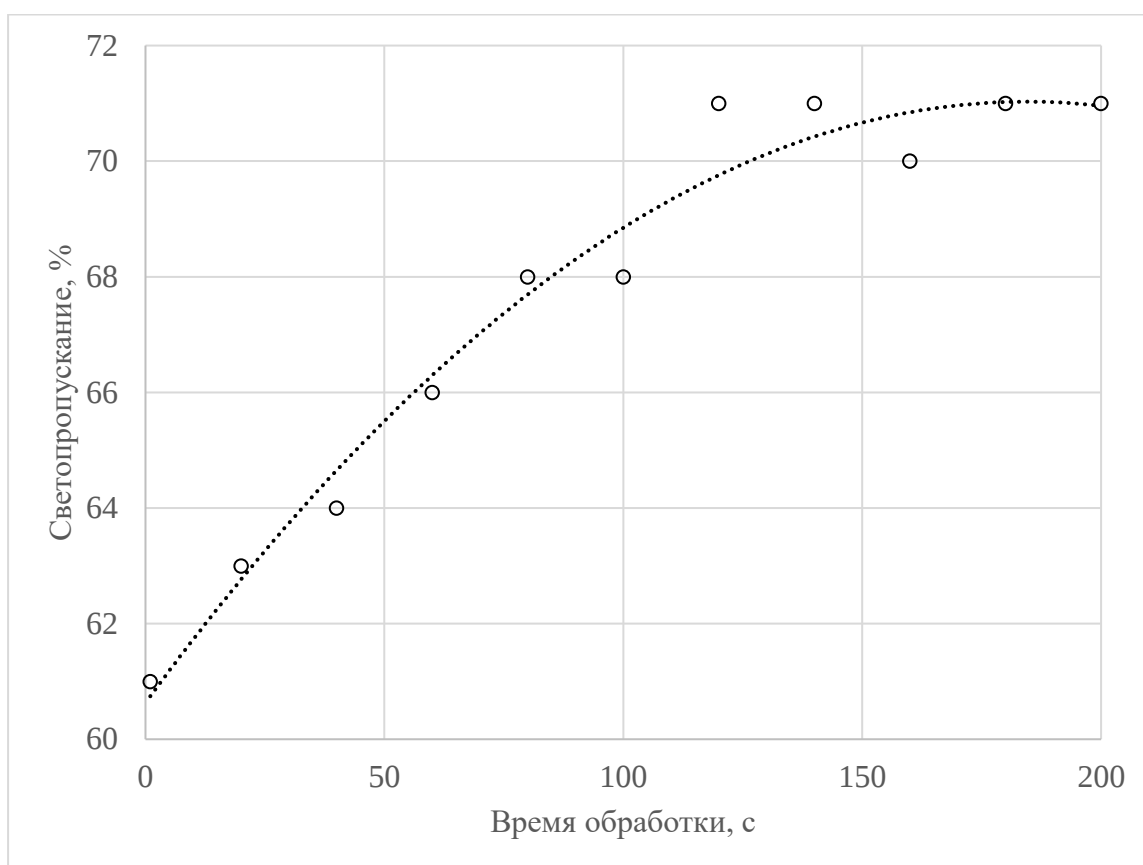


Рисунок 3.16 – Изменение светопропускания образца от изменения времени работы шлифующего инструмента

В проведенных выше исследованиях были определены оптимальные значения фиксированных (не меняемых) технологических параметров, значение которых представлены в таблице 3.8

Таблица 3.8 – Оптимальные технологические параметры воздействия

Технологическое воздействие	Оптимальные значения	Граничные значения
Фиксированные технологические параметры		
Прилагаемое усилие, Н	26±1	20 – 30
Характеристики вибрации: S – амплитуда колебания, мм, f – частота, Гц	0,8 10	0,5 – 1.0 5 – 20
Время обработки одного цикла между замерами светопропускания, с.	120	10 – 200
Исследуемые технологические параметры		
Абразивное зерно инструмента. Мкм	120–160; 80 – 120; 40 – 80; 10 – 40	
Средний угол рельефа	0 – 90	

3.3. Исследование влияния на светопропускание стеклянного образца параметров абразива и среднего угла рельефной поверхности

Для определения зависимости светопропускания от изменяемых факторов, приведенных в таблице 3.8, было проведено исследование по методике, изложенной в пункте 3.1 «Разработка метода вибрационного шлифования» страницы 90–109.

Исследовали изменение светопропускание образцов на каждом этапе после обработки шлифовальным инструментом с зерном различной фракции. Результаты представлены в таблице 3.9 и на рисунке 3.17 [77]

Таблица 3.9 – Результаты исследования

Параметр	Значение			
Начальный относительный коэффициент светопропускания $\tau_o, \%$	68	76	81	85
Конечный относительный коэффициент светопропускания $\tau_k, \%$	76	81	85	87
Изменение относительного коэффициента светопропускания, %	8	5	4	2
Средний размер фракционного зерна, мкм	120-160	80-120	40-80	10-40

В результате проведенного исследования было установлено, что наибольшее увеличение светопропускания – 8 % наблюдается при обработке инструментом, содержащим фракцию 120-160 мкм с последующим уменьшением вклада в процент освещения. Функционально это может быть выражено полиномиальной зависимостью:

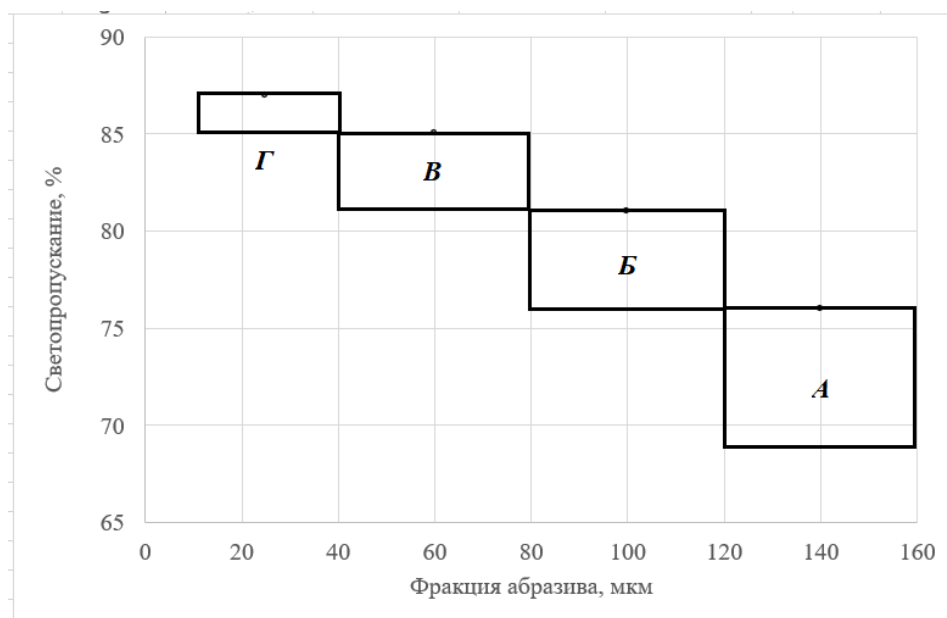
$$T_{\kappa} = -0,001x^2 + 0,06x + 87,78, \quad (3.7)$$

где τ_{κ} – конечный коэффициент относительного светопропускания, %;

x – среднее значение размера зерна во фракции, мкм.

Данная зависимость достаточно хорошо описывает поведение системы с фиксированными параметрами, представленными в таблице 3.8 и имеет среднеквадратичное отклонение равное $R^2 = 0,975$.

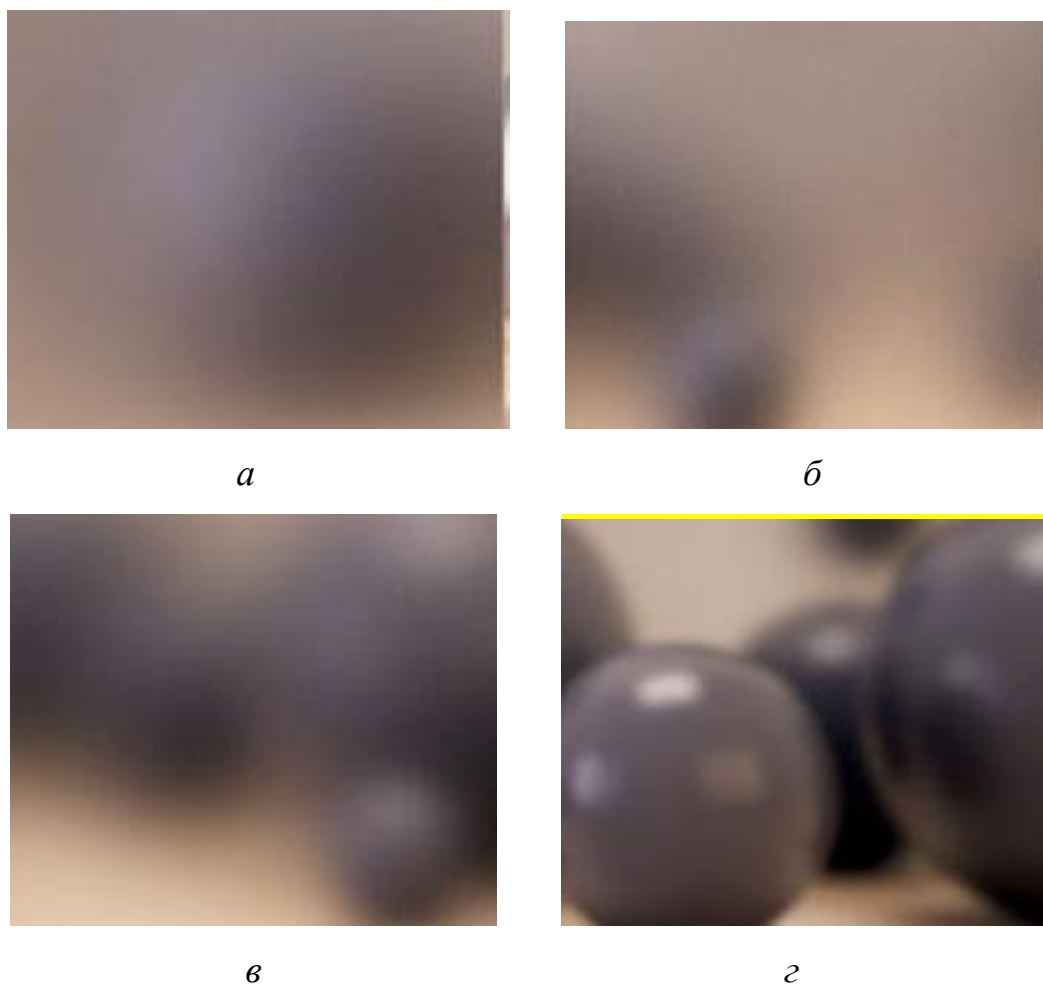
Стоит отметить, что свободный член выражения является максимальным значением относительного освещения образца в исследуемой системе.



Фракция абразива: А – 120–160; Б – 80–120; В – 40–80; Г – 10–40 мкм

Рисунок 3.17 – Изменение относительного коэффициента светопропускания стекла (τ_v) до и после механической обработки

На рисунках 3.18 и 3.19 показаны примеры визуального восприятия стекла после стадий обработки абразивным инструментом.



светопропускание в %: *а* – 68; *б* – 76; *в* – 81; *г* – 88

Рисунок 3.18 – Пример визуального восприятия различной степени светопропускания плоского образца стекла

Проведенное выше исследование изменения светопропускания стеклянного образца относится только к стеклянным рельефам, средний угол которых равен 35° . Данный угол был выбран исходя из начальной исследуемой модели, показанной на рисунке 3.2.

Для полного анализа процесса необходимо провести исследование светопропускания образцов стекла в зависимости от изменения среднего угла несимметричной рельефной поверхности.

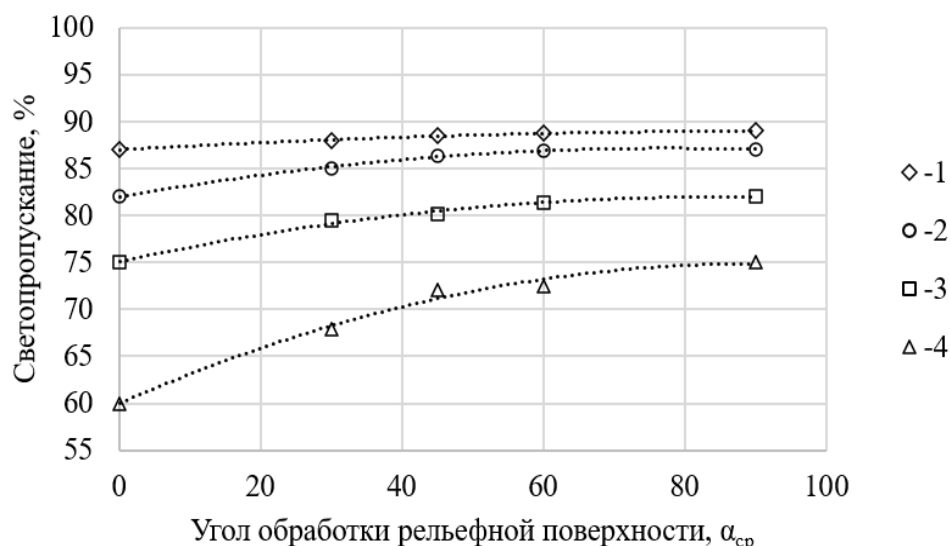
*a**б**в**г*

Светопропускание в %: *a* – 68; *б* – 76; *в* – 81; *г* – 88

Рисунок 3.19 – Пример визуального восприятия несимметричной стеклянной рельефной поверхности после последовательной обработки поверхности шлифовальным инструментом с различным зерном,

Для исследования в качестве переменных использовали не только изменение фракционного состава абразива, но и изменение угла обработки поверхности. В качестве фиксированных значений «средних углов рельефа» выбраны 30, 45, 60 и 90°. Остальные значения фиксированных параметров обработки представлены в таблице 3.8.

Результаты исследования представлены в таблице 3.10 и на рисунке 3.20



Фракция абразива: 1 – 10-40; 2 – 40-80; 3 – 80-120; 4 – 120-160 мкм

Рисунок 3.20 – Зависимости изменения светопропускания (τ_v) для различных фракций абразивного материала, в зависимости от изменения среднего угла рельефной поверхности:

В ходе проведенных испытаний получены зависимости относительного коэффициента светопропускания τ_v от среднего угла рельефной поверхности $\alpha_{ср}$ и среднего размера фракции зерна абразивного порошка (N), показанные на рисунке 3.20 и описываемые полиномиальными формулами, представленными в таблице 3.11.

Все функциональные зависимости, представленные в таблице 3.11 описываются квадратичным полиномом, свободный член которого практически совпадает с теоретическим значением конечного значения относительного коэффициента светопропускания для каждой стадии обработки. В целом представленные зависимости могут быть описаны следующим уравнением:

$$T_v = A \cdot \alpha_{ср}^2 + B \cdot \alpha_{ср} + \tau_{vo}, \quad (3.8)$$

где τ_v – коэффициент светопропускания после обработки рельефной стеклянной поверхности шлифовальным инструментом с абразивной поверхностью;

τ_{vo} – коэффициент светопропускания до обработки рельефной стеклянной поверхности;

α_{cp} – средний угол рельефной поверхности;

A и B – безразмерные коэффициенты.

Таблица 3.10 – Результаты исследования изменения светопропускания при шлифования стеклянного образца при различных средних углах рельефной поверхности

Угол приложения силы	Размер абразивного зерна, мкм	Значение проходящего светового потока до обработки, %	Значение проходящего светового потока после обработки, %
30	120 – 160	61	67,5
45		67,5	72,5
60		72,5	74
90		74	75
30	80 – 120	75	79,0
45		79	80,5
60		80,5	81,5
90		81,5	82
30	40 – 80	82	85
45		85	86,5
60		86,5	87
90		87	87
30	10 – 40	87	88
45		88	88,5
60		88,5	89
90		89	89

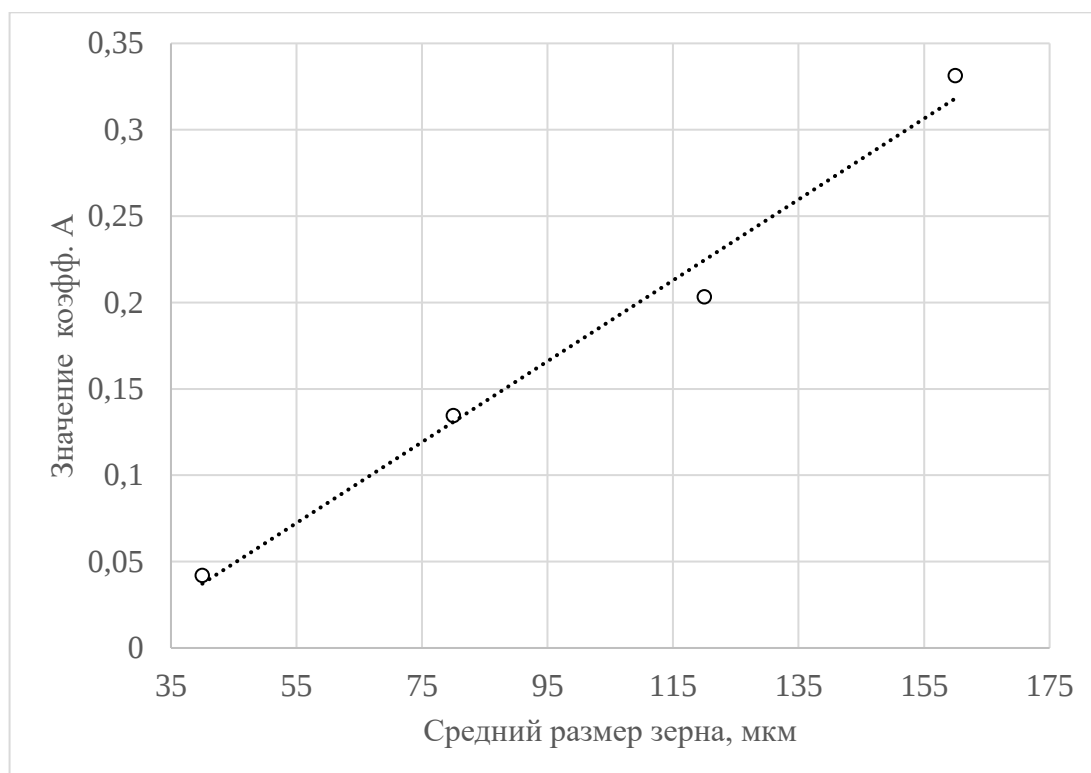
Для определения функциональной зависимости полиномиальных коэффициентов A и B, представленных в таблице 3.12, от среднего размера фракционного зерна составим соответствующие эмпирические зависимости, показанные на рисунке 3.21 и определим их аппроксимирующую зависимость.

Таблица 3.11 – Функциональные зависимости относительного коэффициента светопропускания τ_v от среднего угла рельефной поверхности α_{cp} и среднего размера фракции зерна абразивного порошка N

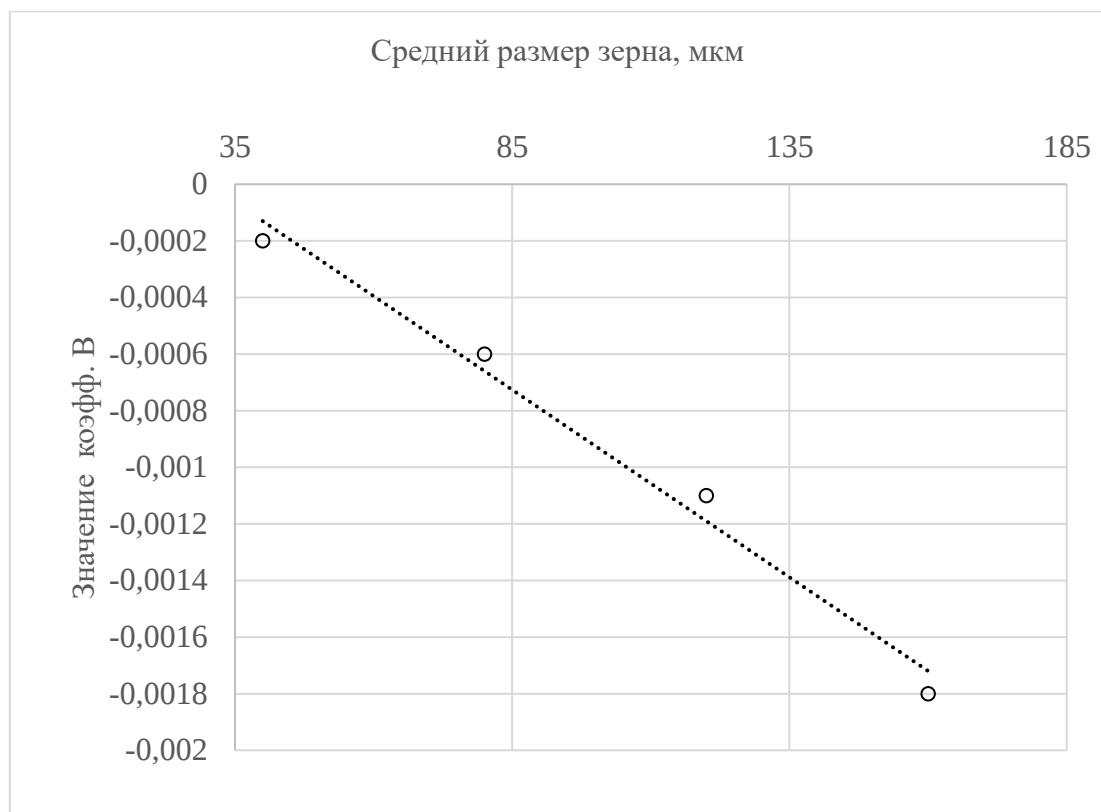
Средний размер фракции зерна абразива, мкм	Полиномиальная зависимость	Среднее квадратичное отклонение, R ²
140	$\tau_v = -0,0002 \alpha_{cp}^2 + 0,042 \alpha_{cp} + 86,987$	0,987
100	$\tau_v = -0,0009 \alpha_{cp}^2 + 0,1344 \alpha_{cp} + 81,942$	0,9862
60	$\tau_v = -0,001 \alpha_{cp}^2 + 0,1632 \alpha_{cp} + 75,082$	0,9818
25	$\tau_v = -0,0018 \alpha_{cp}^2 + 0,3312 \alpha_{cp} + 59,969$	0,9888

Таблица 3.12 – Значения полиномиальных коэффициентов

Полином. Коэффициент	Средний размер фракционного зерна, мкм			
	140	100	60	25
A	-0,0002	-0,0009	-0,001	-0,0018
B	0,042	0,1344	0,163	0,3312



a



б

Значение: *a* – коэффициент А; *б* – коэффициент Б

Рисунок 3.21 – Аппроксимация значений безразмерных коэффициентов относительно среднего размера зерна абразива

Исходя из данных, представленных на рисунке 3.21, значение коэффициентов может быть определено по формулам:

$$A = 0,004 - N \cdot 10^{-5}, \quad (3.9)$$

$$B = 0,06 + 0,002 \cdot N. \quad (3.10)$$

где *N* – средний размер зерна фракции абразивного порошка (в мкм), используемого для обработки стеклянной поверхности.

Выводы по Главе 3.

– предложен способ механической обработки несимметричной рельефной стеклянной поверхности, сформированный в патентное решение .

– впервые понятие «средний угол рельефной поверхности», которое позволяет ввести фактор объективной оценки несимметричных рельефов и может быть определен как как арккосинус отношения площади окружности, описанной вокруг проекции рельефа к фактической площади рельефной поверхности.

– представлен расчет среднего угла рельефной поверхности, а также предложено его практическое применение, позволяющее объективно оценивать как визуальное восприятие рельефной поверхности, так возможность использования этого фактора, для 3Д моделирования объектов.

–определены параметры механического вибрационного шлифования несимметричных рельефных стеклянных поверхностей, позволяющие рассчитывать степень светопропускания обрабатываемого объекта для его дальнейшего использования.

– проведено исследование и выведены закономерности изменения светопропускания рельефной поверхности от параметров рельефа «среднего угла рельефной поверхности» и параметров шлифовального инструмента.

– предложена математическая модель расчета зависимости светопропускания стеклянного рельефа от параметров механического воздействия на объект.

– предложены рекомендации по использованию метода вибрационного шлифования несимметричных рельефных стеклянных поверхностей.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод моллирования листового стекла в вакуумную форму с закрепленным краем для создания стеклянных изделий со сложным несимметричным рельефом.
2. Установлены зависимости и предложен расчет изменения толщины плоского стекла при моллировании в вакуумную форму от типа формы, температуры и разряжения.
3. Разработан метод изготовления рельефных объемов методом вакуумного моллирования из листового стекла с закрепленным краем. Преимущества метода – возможность изготовления объемных изделий методом моллирования с малыми радиусами поверхности и с отрицательными углами моллирования.
4. Исследованы и установлены зависимости в системе температура-деформация-вязкость для плоского стекла в диапазоне $10^6 - 10^9$ П. Разработан метод относительного определения вязкости стекла по имеющемуся эталону для листовых стекол, позволяющий корректировать температуру моллирования без проведения большого количества лабораторных исследований.
5. Исследованы и установлены зависимости изменение светопропускания матовых стекол от типа и фракции абразива, времени обработки поверхности и предложен способ расчета светопропускания стекла в зависимости от технологических параметров механической обработки (шлифования).
6. Предложен метод объективной оценки несимметричной рельефной стеклянной поверхности для оптимизации процесса механического шлифования. Впервые предложено и обосновано определение «среднего угла рельефной поверхности» для несимметричных рельефов как объективного фактора оценки рельефной поверхности.

Разработан способ вибрационного шлифования несимметричных рельефных стеклянных поверхностей, позволяющий контролировать светопропускание матовых стекол с рельефной поверхностью. Преимущества метода – возможность расчета светопропускания в зависимости от технологических параметров механической обработки.

Направление и перспективы дальнейшего исследования по теме

Дальнейшие исследования по теме диссертации предполагают:

- дополнительные исследования с целью совершенствования формообразующих газопроницаемых материалов для создания многоцветных форм для вакуумного моллирования стекла.
- дополнительные исследования и систематизация данных процесса шлифования с использованием различных шлифовальных порошков и инструментов на их основе с целью совершенствования процесса моделирования для прогнозирования зависимости светопропускания от параметров процесса шлифования.
- разработка и публикация монографии и других научных работ по теме вакуумного формования стекла, издание учебных пособий и практических рекомендаций по использованию предложенного метода в процессе обучения специалистов в области обработки материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Weller, U.** Experimentelle Archäologie in Europa, Jahrbuch 2017/ U. Weller, T. Lessig-Weller, E. Hanning. – Postbus – EXAR, 2017, S. 104-115, ISBN: 978-3-944255-10-1.
2. **Петухов, С.П.** Стеклоделие: Руководство для производств: бутылочного, листового, зеркал., посуд. и пр. стекла, с изложением теоретических данных для завод. практики / С.П. Петухов; [Предисл.: Д. Менделеев]. - Санкт-Петербург : К.Л. Риккер, 1898. - XII, 316 с.
3. **Козицын, И. П.** Развитие технологии пластической деформации стекла от Древнего Рима до наших дней / И. П. Козицын, А. В. Семенча. – Санкт-Петербург: ООО "Издательство ВВМ", 2022. – 128 с. – ISBN 978-5-9651-1442-9.
4. **Шишкин, И.В.** История листового стекла/ И. В. Шишкин. - Москва : URSS, сор. 2013. – 393 с: ил., портр., табл.; 22 см. - ISBN 978-5-397-04081-5
5. **Патрушева, К. В.** История выдувания оконных стекол / К. В. Патрушева, Н. В. Патрушев // Молодой ученый. — 2017. — № 1(135). — С. 378–380.
6. ГОСТ 11485-1-2016, Стекло моллированное. Технические требования: межгосударственный стандарт : издание официальное : введен приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 апреля 2017 г. № 305-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации : введен впервые : дата введения 2018-03-01 / подготовлен ОАО "Институт стекла", "Технический комитет по стандартизации ТК 41 "Стекло", [принят] Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации. - Москва : Стандартинформ, 2017. - IV, 11 с.: ил., табл.; 29 см.

7. ГОСТ 11485-2-2016, Стекло моллированное. Термины и определения: межгосударственный стандарт: издание официальное: введен приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 апреля 2017 г. № 306-ст в качестве национального стандарта Российской Федерации : введен впервые : дата введения 2018-03-01 / подготовлен Открытым акционерным обществом "Институт стекла", [принят] Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации. - Москва: Стандартиформ, 2017. - II, 5, 16 с. : ил., табл.; 29 см.
8. ГОСТ 111-2014. Стекло листовое бесцветное. Технические условия: межгосударственный стандарт / Подготовлен институтом стекла. - Взамен ГОСТ 111-2001: Введен в качестве национального стандарта с 2016-04-01; Внес. изм.№1 от 01.02.2020г. (ИУС 12-2019). - Москва: Стандартиформ, 2014. - III, 7, 12 с.; 29 см.
9. ГОСТ 32565-2013. Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия: межгосударственный стандарт: взамен ГОСТ 5727-88, ГОСТ 27902-88, ГОСТ 27903-88, ГОСТ 27904-88: введен 2015-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. - Москва : Стандартиформ, 2014. - IV, 47 с.
- 10.ГОСТ 30698-2014. Стекло закаленное. Технические условия = Tempered glass. Specifications : межгосударственный стандарт / Подготовлен ин-том стекла. - Взамен ГОСТ30698-2000 : Введен в качестве национального стандарта с 2016-04-01. - Москва : Стандартиформ, 2015. - III, 15, 20 с.; 29 см.
- 11.**Магай, А.А.** Современное стекло светопрозрачных фасадов многофункциональных высотных зданий // Вестник МГСУ. 2010. №3.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-steklo->

svetoprozrachnyh-fasadov-mnogofunktsionalnyh-vysotnyh-zdaniy-1 (дата обращения: 17.03.2024).

12. **Müller-Braun, S.** Biaxially curved glass with large radii—determination of strength using the coaxial double ring test. *Glass Struct / S. Müller-Braun, J. Schneider Eng 2.— Glass Structures and Engineering 2(2)— 2017, s. 121–131. DOI:10.1007/s40940-017-0050-9 URL: https://www.researchgate.net/publication/320580902_Biaxially_curved_glass_with_large_radii-determination_of_strength_using_the_coaxial_double_ring_test (дата обращения: 10.02.2024).*
13. **Роткина, К. А.** Обзор моллированных изделий из стекла, получаемых с использованием полусферических форм / К. А. Роткина, А. А. Загоруйко, М. М. Черных // *Технология художественной обработки материалов : сборник материалов XXI Всероссийской научно-практической конференции, Ижевск, 01–03 октября 2018 года. — Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2018. — С. 524-528.*
14. **Дербина, С.Н.** Эволюция конструктивных решений светопрозрачных фасадов / С.Н. Дербина, П.В. Борискина, А.А. Плотников / *Вестник МГСУ. 2011. №2-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-konstruktivnyh-resheniy-svetoprozrachnyh-fasadov-1> (дата обращения: 17.03.2024).*
15. **Грошкова, Л.Г.** Особенности исследования истории художественного стекла // *Евразийский Союз Ученых. 2015. №11-1 (20). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-issledovaniya-istorii-hudozhestvennogo-stekla> (дата обращения: 10.02.2024).*
16. **Субботина, О.С.** Возникновение и развитие жанра стеклопластики в советском художественном стекле // *Артикульт. 2015. №2 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozniknovenie-i-razvitie-zhanra>*

stekloplastiki-v-sovetskom-hudozhestvennom-stekle (дата обращения: 10.02.2024).

17. **Дайнеко, В. В.** Художественные изделия из стекла в технологии спекания для декоративного оформления интерьеров /В. В. Дайнеко, А. Д. Калихман. – Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. №2 (5). URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/hudozhestvennye-izdeliya-iz-stekla-v-tehnologii-spekaniya-dlya-dekorativnogo-oformleniya-interierov> (дата обращения: 10.02.2024).
18. **Гуляян, Ю.А.** Физико-химические основы технологии стекла / Ю. А. Гуляян. - Владимир : Транзит-ИКС, 2008 Владимир. – 735 с. : ил.; 21 см.; ISBN 978-5-8311-0383-0
19. **Клюев, В. П.** Зависимость дилатометрических свойств стекол от их структуры. II. Силикатные, фосфатные, фторсодержащие и титансодержащие стекла / В. П. Клюев // Физика и химия стекла. – 2006. – Т. 32, № 2. – С. 271-285.
20. **Аппен А.А.** Химия стекла [Текст]/ Ленинград : Химия. Ленинградское. отделение, 1970. - 351 с. : ил.; 22 см.
21. Производство стекла: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС) 5-2015. – Москва : Бюро НДТ, 2015. – URL: [https:// docs.cntd.ru/document/1200128665](https://docs.cntd.ru/document/1200128665)
22. **Матвеев, Ю.Н.** Система непрерывного мониторинга и управления качеством производства стеклодротов // Программные продукты и системы. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-nepreryvnogo-monitoringa-i-upravleniya-kachestvom-proizvodstva-steklodrotov> (дата обращения: 03.03.2024).
23. **Петрусенко, П. А.** Совершенствование контрольных операций при производстве стеклянных трубок / П. А. Петрусенко, А. П. Шумская // Приборостроение-2016 : материалы 9-й международной научно-технической конференции, Минск, 23-25 ноября 2016 г. / Белорусский

национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев [и др.].
– Минск, 2016. – С. 196-197.

24. Патент № 2515658 С1 Российская Федерация, МПК С03В 23/023.
форма для моллирования листового стекла : № 2013106353/03 : заявл.
13.02.2013: опубл. 20.05.2014 / А. В. Пестов, А. Е. Пигалев, Д. Н.
Петрачков [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество
"Обнинское научно-производственное предприятие "Технология".
25. Патент № 2387600 С1 Российская Федерация, МПК С03В 23/025.
способ изготовления рамки для форм моллирования стекла : №
2008136332/03 : заявл. 09.09.2008: опубл. 27.04.2010 / А. Л.
Гореловский; заявитель Общество с ограниченной ответственностью
"ТЕХНОСОЮЗСЕРВИС".
26. Патент № 2534863 С2 Российская Федерация, МПК С03В 23/02.
форма для моллирования листового стекла: № 2013102805/03 : заявл.
22.01.2013 : опубл. 10.12.2014 / А. В. Пестов, А. Н. Ромакин, М. М.
Ворвуль [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество
"Обнинское научно-производственное предприятие "Технология".
27. Патент № 2631949 С Российская Федерация, МПК С03В 23/023.
устройство для гнутья листового стекла: № 2016118821: заявл.
17.05.2016: опубл. 29.09.2017 / В. Ф. Солинов, А. А. Комлев; заявитель
Акционерное общество "Научно-исследовательский институт
технического стекла".
28. Патент № 2314261 С Российская Федерация, МПК С03В 23/025.
Способ формования стекла или стеклокерамики: № 2003125097: заявл.
15.08.2003: опубл. 10.03.2005 Дёринг Торстен (DE), Едамзик Р. (DE),
Эземанн Х. (DE), Хёльцель Э. (DE), заявитель Шотт АГ (DE)
29. Патент № US 20210101820, United States of America МПК К03В23/035.
Bending thin glass: № US 20210101820: заявл. 23/11/2017: опубл.

08.04.2021. Philippe F, Hervé T, Thierry O, заявитель Pillsbury Winthrop Shaw Pittman LLP

30. Патент № 2465225 С2 Российская Федерация, МПК C03B 23/027.

Моллирование листового стекла: № 2009125591/03: заявл. 27.11.2007: опубл. 27.10.2012 / Я. Н. Тетлоу, Л. Р. Де Жезус ; заявитель пилкингтон груп лимитед, пилкингтон бразил лтд А.

31. **Китайгородский, И.И.** Справочник по производству стекла / Под ред. заслуж. деятеля науки и техники РСФСР д-ра техн. наук проф. И. И. Китайгородского и канд. техн. наук доц. С. И. Сильвестровича. - Москва : Госстройиздат, 1963. – 1 т, 1026 с.

32. **Загородний А.** Исходные предпосылки расчёта температурных полей и деформаций листового стекла в процессе моллирования / Н. А. Загородний, О. Ю. Боровская, А. А. Кравченко [и др.] // IX Международный молодежный форум "Образование. Наука. Производство", Белгород, 01–10 октября 2017 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. – С. 247-251.

33. **Насыров, З.** Материаловедение и технология оптических и конструкционных материалов: технология оптических деталей/ З. А. Насыров [и др.]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Казан. гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. – ISBN 5-7579-0698-7.

34. **Таганцев, Д. К.** Стеклообразные материалы / Д. К. Таганцев ; М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т, Нац. исслед. ун-т. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 202 с. – ISBN 978-5-7422-3238-4.

35. **Fulcher, G.S.** Analysis of Recent Measurement of the Viscosity of Glasses Journal of the American Ceramic Society –8(6): –2006 ss. 339 – 355 URL: https://www.researchgate.net/publication/229888575_Analysis_

of_Recent_Measurement_of_the_Viscosity_of_Glasses (дата обращения: 03.03.2024).

36. Патент № SU194411A1 СССР, МПК G01 N3/22. Устройство для измерения вязкости стекол в интервале температур размягчения и отжига: № 194411: заявл. 15.04.1966: опубл. 30.03.1967, авторы Зезин М, Охотин М, Тузиков А.
37. **Шабарова, Л.В.** Расчетно-экспериментальная методика определения вязкости расплавов // Вестник ННГУ. 2012. №5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetno-eksperimentalnaya-metodika-opredeleniya-vyazkosti-rasplavov> (дата обращения: 03.03.2024).
38. **Klyuev, V. P.** Indenter-penetration viscometry of glasses for small-sized samples under conditions of continuous heating / V. P. Klyuev // Glass Physics and Chemistry. – 2000. – Vol. 26, No. 6. – P. 559-565. – DOI 10.1023/A:1007148130303.
39. Патент № 2702695 C1, Российская Федерация, МПК G01N11/00. Способ быстрого определения температурной зависимости вязкости и характеристических температур стекол и устройство для его реализации № 2019103628: заявл. 08.05.2019: опубл. 09.10.2019 / Миронов Р, Крюков А, Забежайлов М, Цветкова М, Русин М. заявитель: Акционерное общество "Обнинское научно-производственное предприятие "Технология"им. А.Г. Ромашина" (RU)
40. **Boyd, K.** Surface tension and viscosity measurement of optical glasses using a scanning CO₂ laser/ K. Boyd, H. Ebendorff-Heidepriem, T. M. Monro. –Optical Materials Express т. 2, выпуск 8, с. 1101-1110. 2012. URL:<https://opg.optica.org/ome/fulltext.cfm?uri=ome-2-8-1101&id=240049> (дата обращения: 10.02.2024).
41. **Клюев, В. П.** Измерения вязкости стекол методом вдавливания конического индентора в тонкие пластинки / В. П. Клюев // Физика и химия стекла. – 2001. – Т. 27, № 5. – С. 611-622.

42. **Голеус, В. И.** Расчет вязкости эмалевых стекол в области температур размягчения / В. И. Голеус, А. А. Салей // Стекло и керамика. – 2014. – № 9. – С. 38-40.
43. Сандитов, Д. С. Математическая обработка экспериментальных данных по вязкости расплавов стекол в широком интервале температур / Д. С. Сандитов, А. А. Машанов // Физика и химия стекла. – 2010. – Т. 36, № 1. – С. 55-59.
44. Вильданов, С. К. Расчет вязкости и теплопроводности стекол на основе системы $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--R}_2\text{O}$, где R – Na и K с добавками CaO, MgO, FeO при высокой температуре / С. К. Вильданов // Физика и химия стекла. – 2021. – Т. 47, № 3. – С. 306-319. – DOI 10.31857/S0132665121030136.
45. Пушкарева, М. В. Принципы и метод расчета вязкости стекол в широком интервале состава и температур специальность 05.17.11 "Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пушкарева Марина Владимировна. – Екатеринбург, 1993. – 19 с.
46. **Левицкий, И.А.** Расчет вязкости многокомпонентных боросиликатных стекол / И. А. Левицкий, Е. И. Блинова, Л. Ф. Папко, Ю. Г. Павлюкевич // Труды БГТУ. №3. Химия и технология неорганических веществ. – 2010. – Т. 1, № 3. – С. 47-50.
47. **Машанов, А. А.** Определение предэкспоненциального множителя в уравнении вязкости с привлечением полинома Лагранжа / А. А. Машанов, С. С. Бадмаев, Д. С. Сандитов // Вестник Бурятского государственного университета. – 2010. – № 3. – С. 140-143
48. Патент № 2696473 С1 Российская Федерация, МПК В24В 7/24, В24В 9/10. устройство обработки листового стекла : № 2018106519 : заявл. 24.08.2016 : опубл. 01.08.2019 / К. Бандо ; заявитель БАНДО КИКО КО., ЛТД.

49. Патент № 2741039 С1 Российская Федерация, МПК С25D 11/06. Способ формирования износостойкого самоприрабатывающегося покрытия на рабочих элементах спирального детандера из алюминиевого сплава : № 2020130830 : заявл. 18.09.2020 : опубл. 22.01.2021 / С. В. Сергеев, М. Ш. Аль-Бдейри, С. О. Баранов ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный национальный исследовательский университет" (НИУ "БелГУ").
50. Патент на полезную модель № 160745 U1 Российская Федерация, МПК В24В 7/00, В24D 7/00. шлифовальный круг : № 2015123935/02 : заявл. 22.06.2015 : опубл. 27.03.2016 / В. В. Глебов, А. Ю. Шурыгин, Р. А. Ильин ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ).
51. Патент № 2693719 С1 Российская Федерация, МПК В24В 9/10, С03С 19/00. устройство обработки листового стекла : № 2018114293 : заявл. 20.10.2016 : опубл. 04.07.2019 / К. Бандо ; заявитель БАНДО КИКО КО., ЛТД.
52. **Злотников, И. И.** СОЖ на основе растворов полимеров для механической обработки стекла / И. И. Злотников, П. А. Хило, М. И. Зубрицкий // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 6. – С. 655-658.
53. Патент № 2475522 С1 Российская Федерация, МПК С10М 173/00, С10М 173/02. Смазочно-охлаждающая жидкость для механической обработки стекла и других материалов : № 2011150867/04 : заявл. 14.12.2011 : опубл. 20.02.2013 / В. С. Кондратенко, Н. И. Кобыш ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет приборостроения и информатики".

54. **Hong, M.** Effect of Polishing Grinding Conditions on Alkali-free/–
Glass/Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology
Engineers, – 25:6, – 2016 ss. 440–444.
URL:[https://www.researchgate.net/
publication/315900132_Effect_of_Polishing_Grinding_Conditions_on_Al
kali-free_Glass](https://www.researchgate.net/publication/315900132_Effect_of_Polishing_Grinding_Conditions_on_Alkali-free_Glass) (дата обращения: 10.02.2024).
55. **Li, H.N.** Лидо Д. Evaluation of grinding-induced subsurface damage in
optical glass BK7/ Journal of Materials Processing Technology, т. 10,
2015, с.229. – DOI:10.1016/j.jmatprotec.2015.11.003 URL:
[https://www.researchgate.net/publication/ 284121385 Evaluation of
grinding-induced subsurface damage in optical glass_BK7](https://www.researchgate.net/publication/284121385_Evaluation_of_grinding-induced_subsurface_damage_in_optical_glass_BK7) (дата
обращения: 10.02.2024).
56. **Stowers, I. F.** Ductile Grinding of Glass/ Materials Fabrication Division
Mechanical Engineering // электронная библиотека: URL: [https://www.
Academia.edu/27772265/ Ductile Grinding of Glass](https://www.Academia.edu/27772265/Ductile_Grinding_of_Glass) (дата обращения:
10.02.2024).
57. **Козерук, А.** Математическое моделирование рабочей зоны
технологического оборудования для двусторонней обработки линз / А.
С. Козерук, Д. Л. Мальпика, М. И. Филонова [и др.] // Наука и техника.
– 2018. – Т. 17, № 3. – С. 204-210. – DOI 10.21122/2227-1031-2018-17-
3-204-210.
58. Патент на полезную модель № 75603 U1 Российская Федерация, МПК
B24D 7/18. шлифовальный круг : № 2008106277/22 : заявл. 18.02.2008
: опубл. 20.08.2008 / Ю. П. Холмогорцев ; заявитель Общество с
ограниченной ответственностью "Челябинский тракторный завод-
УРАЛТРАК".
59. Патент № 2595283 C2 Российская Федерация, МПК C03C 15/02, C03C
19/00. способ шлифования и полирования стекла: № 2014119585/03 :
заявл. 15.05.2014 : опубл. 27.08.2016 / Ю. И. Машир, А. Н. Ситкин, В.

Ф. Солинов ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство Промышленности И Торговли Российской Федерации.

60. **Еремин, М. Ю.** Исследование динамических характеристик процесса абразивного микрорезания хрупких неметаллических материалов / М. Ю. Еремин, Н. А. Черемисинова, Р. М. Панов // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4, № 1(13). – С. 162-168. – DOI 10.12737/3363.
61. **Курдюков, В. И.** Расчет значений размеров абразивного зерна классифицированного по ГОСТ 52381-2005 / В. И. Курдюков, А. А. Андреев, Н. Л. Костырева // Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию технологического факультета, Курган, 08–10 декабря 2010 года. – Курган: Курганский государственный университет, 2010. – С. 107-111.
62. **Жукова, Л. Т.** Исследование процесса моллирования плоского стекла в вакуумную форму / Л. Т. Жукова, И. П. Козицын // Дизайн. Материалы. Технология. – 2022. – № 3(67). – С. 94-100. – DOI 10.46418/1990-8997_2022_3(67)_94_100.
63. Патент № 2607841 С1 Российская Федерация, МПК С03В 23/035. Способ вакуумного моллирования и устройство для его реализации : № 2015149541 : заявл. 18.11.2015 : опубл. 20.01.2017 / И. П. Козицын ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургская Государственная художественно-промышленная Академия имени А.Л. Штиглица".
64. **Жукова, Л. Т.** Исследование влияния геометрии формующих элементов на процесс вакуумного моллирования плоского стекла / Л. Т. Жукова, И. П. Козицын // Технология художественной обработки

материалов : материалы XXIV всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 08–12 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2021. – С. 313-319.

65. **Левицкий, И.А.** Влияние вязкостных характеристик стекол на технологические параметры получения волоконно-оптических изделий // Труды БГТУ. №3. Химия и технология неорганических веществ. 2016. №3 (185). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vyazkostnyh-harakteristik-stekol-na-tehnologicheskie-parametry-polucheniya-volokonno-opticheskikh-izdeliy>(дата обращения: 18.02.2024).
66. **Козицын, И. П.** Анализ температурно-вязкостных параметров листового стекла / И. П. Козицын, Л. Т. Жукова // Дизайн. Материалы. Технология. – 2023. – № 3(63). – С. 70-74. – DOI 10.46418/1990-8997_2021_3(63)_70_74.
67. **Жукова, Л. Т.** метод определения вязкости стекла по имеющемуся аналогу / Л. Т. Жукова, И. П. Козицын // Дизайн. Материалы. Технология. – 2022. – № 4(68). – С. 91-97. – DOI 10.46418/1990-8997_2022_4(68)_91_97.
68. **Христофоров, А. И.** Расчет физико-химических свойств стекол : / А. И. Христофоров, И. А. Христофорова / М-во образования Рос. Федерации, Владим. гос. ун-т. – Владимир : Владимир. гос. ун-т, 2004. – 80 с. – ISBN 5-89368-491-5.
69. **Козицын, И. П.** Интерполяция коэффициентов расчета вязкости стекла по методу Охотина на интервал $9 > \lg(\eta) > 5$ / И. П. Козицын, Л. Т. Жукова // Дизайн. Материалы. Технология. – 2023. – № 3(63). – С. 70-74. – DOI 10.46418/1990-8997_2021_3(63)_70_74. – EDN RYZRLL.
70. **Старцев, Ю. К.** Влияние замены оксида натрия оксидом калия на вязкость стекол системы $Na_2O-K_2O-SiO_2$ // Известия СПбГТИ (ТУ). 2014. №25 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-zameny->

oksida-natriya-oksidom-kaliya-na-vyazkost-stekol-sistemy-na-2o-k-2o-sio-2 (дата обращения: 03.03.2024).

71. Патент № 2796330 С1 Российская Федерация, МПК G01N 11/00. Способ определения вязкости стекла : № 2022114962 : заявл. 01.06.2022 : опубл. 22.05.2023 / И. П. Козицын, Л. Т. Жукова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна.
72. **Козицын, И.П.** Перспективные направления применения технологии вакуумного моллирования плоских стекол. / И. П. Козицын, Л. Т. Жукова // Дизайн. Материалы. Технология. 3(23)2023 С. 90 – 96.
73. ГОСТ 8.829-2013 Методика измерения оптической плотности (коэффициента пропускания) Общие технические условия: межгосударственный стандарт: введен 2016-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. - Москва : Стандартинформ, 2015. - 8 с.
74. ГОСТ 52381-2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. Общие технические условия: межгосударственный стандарт: введен 2006-01-07 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. - Москва : Стандартинформ, 2006. - 10 с.
75. **Мазурин, В.Л.** Полиуретан как конструкционный материал XXI века // Глобальная энергия. 2013. №2 (171). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poliuretan-kak-konstruktsionnyy-material-xxi-veka> (дата обращения: 03.03.2024).
76. **Шапошникова, С.** Введение в блендер/ URL: <https://svetlanazyatikova.files.wordpress.com//2018/10/blender-d183d180d0bed0bad0b8.pdf> (дата обращения: 03.03.2024).

77. **Kozitsyn, I. P.** Method of complex glass relief surfaces mechanical grinding/ L. Zukova, I. Kozitsyn – Текст: электронный – E3S Web of Conf. – 2023 – Volume 389. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338901012> (дата обращения 31.04.2023)
78. Патент № 2804708 С1 Российская Федерация, МПК В24 В1/00. Способ абразивной обработки рельефной поверхности : № 2022133841 : заявл. 21.12.2022 : опубл. 04.10.2023 / И. П. Козицын, Л. Т. Жукова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна.
79. **Козицын, И. П.** Основные проблемы, возникающие при создании плоских фактурных и рифленых стекол, и их решения / И. П. Козицын, Л. Т. Жукова // Дизайн. Материалы. Технология. – 2021. – № 3(63). – С. 70-74.

Приложение А

Материалы и оборудование, используемое в исследовании

Система добровольной сертификации «Испытательный научно-технический центр сертификации, стандартизации ЕАЭС и международных услуг» Зарегистрирована Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии Регистрационный номер РОСС RU.32396.04НТЦ0	
 НТИ	СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ
№ РОСС RU.32396.04НТЦ0.OC02.01492 Срок действия с 17.06.2022 по 16.06.2025 № 0001761	
ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ рег. № РОСС RU.32396.04НТЦ0.OC02 Общества с ограниченной ответственностью «МОСТЕХНОРУС». Место нахождения: 127490, Г. Москва, ул. Мусоргского, дом 11, телефон: 8 (4812) 63-39-09, электронная почта: fss-info1@mail.ru. Аттестат аккредитации № 04НТЦ0.OC02, выдан 13.04.2021 года	
ПРОДУКЦИЯ Стекло листовое бесцветное (марки: М0, М1, М4, М7) и особо прозрачное (марки: М0(П), М1(П)) по ГОСТ 111-2014 в ассортименте толщин 2,9-4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0 мм. Серийный выпуск	
СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ГОСТ 111-2014 «Стекло листовое бесцветное. Технические условия» п.п. 4.5, 4.6, 4.9, 5.1.1-5.1.5	
ИЗГОТОВИТЕЛЬ Акционерное общество «Саратовстекло». Место нахождения: 410041, Саратовская область, г. Саратов, улица им. Ломоносова М.В., дом 1, ИНН 6453054397, ОГРН: 1026403044073, телефон: +7 (8452) 305-929, адрес электронной почты: head@sar-steklo.ru	
СЕРТИФИКАТ ВЫДАН Акционерное общество «Саратовстекло». Место нахождения: 410041, Саратовская область, г. Саратов, улица им. Ломоносова М.В., дом 1, ИНН 6453054397, ОГРН: 1026403044073, телефон: +7 (8452) 305-929, адрес электронной почты: head@sar-steklo.ru	
НА ОСНОВАНИИ Протоколов испытаний №26/05-2022, 27/05-2022, 28/05-2022, 29/05-2022, 30/05-2022, 31/05-2022 от 15.06.2022, выданного: Производственная и испытательная лаборатория Акционерного общества «Салаватстекло». Аттестат аккредитации: № RA.RU.21CT46 от 23.07.2015. Адрес: 453253, РОССИЯ, Республика Башкортостан, г. Салават, ул. Индустриальная, 18	
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ Схема сертификации: 1с (ГОСТ Р 53603-2020 Оценка соответствия. Схемы сертификации продукции в Российской Федерации)	
 Руководитель органа Эксперт	 Машин Вадим Николаевич Григорьев Александр Степанович
Сертификат не применяется при обязательной сертификации	

Рисунок А.1 – Сертификат соответствия ГОСТ 111-2014 исследуемого листового стекла

Copyright © 2004 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from John Wiley & Sons, Inc.

Рисунок А.2 – Сертификат соответствия ГОСТ 145-2018 для гипса Г-16

продолжение приложения А

Характеристика наполнителя для производства муки SIKRON®

Таблица А.1 – Типовые характеристики зерна абразивного порошка

SIKRON®	SF 3000	SF 4000	SF 6000	SF 8000
Медианный диаметр частиц, мкм: максимальный d95%	24	18	10	7
Медианный диаметр частиц, мкм: средний d50%	7	5	3	2,5
Диаметр частиц, мкм	Лазерный гранулометр CILAS (остаток в объёме %)			
24	5			
16	18	8		
12	30	17	2	
8	43	32	13	2
6	52	42	24	7
4	63	56	42	22
2	81	76	70	58

Таблица А.2 – Типовые физические свойства

Плотность (DIN ISO 787-10)	2,35
Показатель pH (DIN ISO 10390)	8,5
Твердость (по Моосу)	6,5
Линейный коэффициент температурного расширения	α 20–300 °C (DIN 51045) $54 \cdot 10^{-6} \cdot K$ -1

Таблица А.3 – Типовой химический анализ (%)

SiO ₂	99
Al ₂ O ₃	0,35
Fe ₂ O ₃	0,05
CaO + MgO	0,1
Na ₂ O + K ₂ O	0,2
Потери при прокаливании 1000°C (DIN EN ISO 3262-7)	0,2
Влажность (DIN ISO 787-2)	0,1



Рисунок А.3 – Прибор для определения газопроницаемости песков и влажных, сухих или отвержденных образцов формовочных и стержневых смесей согласно ГОСТ 23409.6–78.

Таблица А.5 - Характеристики прибора

Параметры	мод. 04315
Диапазон измерений, единиц газопроницаемости:	30-300, 300-1000
Давление воздуха под колоколом, Па (мм вод. ст.):	980,7±9,8 (100±1)
Абсолютная погрешность, единиц газопроницаемости, в пределах измерений:	30-300 ед: ±15 300-1000 ед: ±50
Установленный срок службы, лет:	10
Установленная безотказная наработка, измерений:	5000
Габаритные размеры, мм:	240x336x470
Масса, кг	14,5



Рисунок А.5 – Внешний вид оптического 3Д сканера с активным освещением

Таблица А.9 – Технические характеристики 3Д сканера RangeVision NEO

Технология 3Д сканирования	Сбор данных о геометрии объекта путем наложения оптической сетки, оптическая триангуляция
Источник света	LED
Параметры сканирования	
Разрешение камер	2 Мп
Захват текстур	Да
Точность	0,05 мм
3D-разрешение	0,13 мм
Размер сканируемого объекта	30-200 мм
Зона сканирования	200 x 150 x 150 мм
Рекомендуемое рабочее расстояние	300 мм

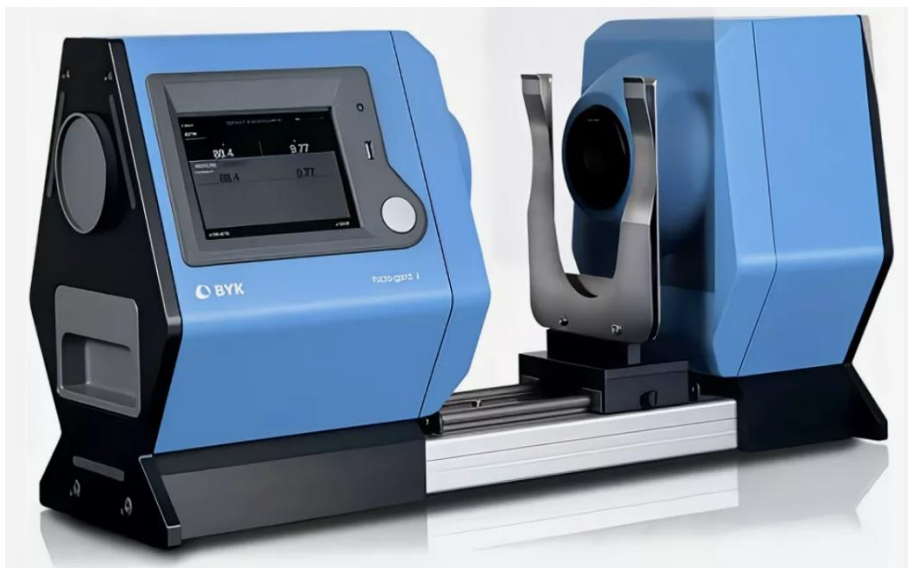


Рисунок А.6 – Внешний вид спектрофотометра HAZE-GARD i

Показания Спектрофотометра HAZE-GARD i соответствуют ГОСТ 8.829-2013 «Методика измерений оптической плотности (коэффициента пропускания)»

Таблица А.10 – Метрологические характеристики спектрофотометра HAZE-GARD i

Метрологические характеристики	Значение
Геометрия освещения/наблюдения	00/D
Диаметр измерительной апертуры, мм	25,4
Область измерения, мм	18
Типы источников освещения в соответствии с рекомендациями Международной комиссии по освещению (МКО)	A, C и D65
Диапазон показаний светового коэффициента пропускания $T_{св} = Y, \%$	0 - 100
Диапазон измерений светового коэффициента пропускания $T_{св} = Y, \%$	1,4 – 98,0
Пределы допускаемого значения абсолютной погрешности измерения светового коэффициента пропускания, % - для источников излучения типа A - для источников излучения типа C и D65	± 1 ± 2

Таблица А.11 – Технические характеристики спектрофотометра HAZE-GARD
i

Технические характеристики	
Диапазон показаний мутности, % - принцип измерения ASTM-C - принцип измерения ASTM-A - принцип измерения ISO	0 - 100
Диапазон показаний прозрачности, %	0 - 100
Электропитание осуществляется от сети переменного тока с напряжением, В частотой, Гц	115/230 50/60
Габаритные размеры, мм, не более (высота × ширина × длина)	620 × 330 × 220
Масса, кг, не более	18
Условия эксплуатации: - температура окружающей среды, °С - относительная влажность воздуха (без конденсации), %, не более	10 – 40 85

Приложение Б

Экспериментальные данные

Таблица Б.1 – Режимы отжига форм

Размер формы, мм	Стадия	Продолж. (ч)	Температура, °С
85 x 100	нагрев	1	150
	выдержка	2	150
	нагрев	2	375
	выдержка	2	375
	нагрев	2	580
	выдержка	2	580
	нагрев	2	850
	выдержка	2	850
	снижение	12	20
120 x140	нагрев	1	150
	выдержка	3	150
	нагрев	2	375
	выдержка	2	375
	нагрев	2	580
	выдержка	2	580
	нагрев	2	850
	выдержка	3	850
	снижение	16	20

продолжение приложения Б

Таблица Б.2 – Экспериментальные данные определения газопроницаемости масс

Соотношение Н2О/сухая смесь	Соотношение гипс/β-кристобалит, %							
	50/50		55/45		60/40		65/35	
	Газопропускание смеси							
	Значение		Значение		Значение		Значение	
	Экспер имент	Сред нее	Экспер имент	Сред нее	Экспер имент	Сред нее	Экспер имент	Сред нее
0,38	0,60	0,58	0,56	0,56	0,58	0,54	0,52	0,49
	0,58		0,54		0,52		0,47	
	0,56		0,57		0,55		0,50	
	0,57		0,57		0,54		0,48	
	0,59		0,55		0,53		0,48	
0,4	0,54	0,53	0,48	0,46	0,44	0,45	0,40	0,42
	0,58		0,44		0,46		0,45	
	0,53		0,43		0,46		0,47	
	0,52		0,48		0,43		0,40	
	0,50		0,48		0,47		0,40	
0,42	0,50	0,48	0,48	0,45	0,45	0,43	0,50	0,44
	0,46		0,47		0,40		0,42	
	0,46		0,40		0,41		0,41	
	0,51		0,43		0,46		0,45	
	0,47		0,45		0,43		0,44	
0,44	0,55	0,51	0,49	0,47	0,50	0,47	0,51	0,48
	0,48		0,45		0,45		0,46	
	0,49		0,46		0,47		0,48	
	0,51		0,48		0,47		0,46	
	0,52		0,47		0,46		0,48	
0,46	0,61	0,59	0,52	0,50	0,60	0,57	0,56	0,54
	0,57		0,48		0,55		0,51	
	0,55		0,52		0,57		0,54	
	0,62		0,47		0,58		0,55	
	0,60		0,49		0,56		0,53	

продолжение приложения Б

Таблица Б.3 – Экспериментальные данные определения горизонтального температурного градиента в печи

Расстояние от стенки, мм	Температура, С		Расстояние от стенки, мм	Температура, С	
	Эксперимент	Средняя		Эксперимент	Средняя
0	796	794	50	800	802
	793			801	
	793			802	
	794			803	
5	804	803	60	801	801
	803			801	
	801			800	
	802			803	
10	810	808	70	802	800
	808			799	
	806			799	
	806			800	
20	807	804	80	800	801
	802			801	
	804			800	
	803			802	
30	803	803	90	800	800
	804			801	
	802			800	
	801			799	
40	802	801	100	800	800
	801			800	
	800			801	
	801			800	

продолжение приложения Б

Таблица Б.4 – Экспериментальные данные определения толщины стекла после моллирования в конусные формы

Угол конуса при вершине					
45°		60°		90°	
высота сечения h , мм	толщина стекла x_i , мм	высота сечения h , мм	толщина стекла x_i , мм	высота сечения h , мм	Толщина стекла x_i , мм
1	2	3	4	5	6
0	6	0	6	0	6
0	4,15	0	4,5	0	5,12
	4,3		4,7		5,1
	4,1		4,4		5,14
	4,05		4,45		5,12
-12	3,6	-9	4,11	-5	4,93
	3,8		4,13		4,9
	3,3		4,08		5
	3,7		4,1		4,97
-24	3,08	-17	3,72	-10	4,72
	3,1		3,8		4,85
	3,06		3,75		4,6
	3,07		3,6		4,7
-36	2,59	-26	3,33	-15	4,5
	2,72		3,50		4,73
	2,51		3,23		4,37
	2,54		3,26		4,41
-48	2,13	-35	2,94	-20	4,27
	2,24		3,09		4,48
	2,07		2,85		4,15
	2,09		2,88		4,19
-60	1,71	-43	2,55	-25	4,01
	1,80		2,68		4,21
	1,66		2,48		3,89
	1,68		2,50		3,93

продолжение таблицы Б.4

1	2	3	4	5	6
-72	1,32	-52	2,16	-30	3,73
	1,39		2,27		3,92
	1,28		2,10		3,62
	1,29		2,12		3,66
-85	0,98	-61	1,77	-35	3,42
	1,03		1,86		3,59
	0,95		1,72		3,32
	0,96		1,74		3,35
-97	0,67	-69	1,38	-40	3,07
	0,70		1,45		3,22
	0,65		1,34		2,98
	0,66		1,35		3,01
-109	0,42	-78	1,01	-45	2,65
	0,44		1,06		2,78
	0,41		0,98		2,57
	0,41		0,99		2,60
-121	0,23	-87	0,67	-50	2,2
	0,24		0,70		2,31
	0,22		0,65		2,14
	0,23		0,66		2,16

продолжение приложения Б

Таблица Б.5 – Экспериментальные данные определения толщины стекла после моллирования в цилиндрическую форму

Глубина сечения h , мм	Толщина стекла, мм	Глубина сечения h , мм	Толщина стекла, мм
0	6,12	-50	1,53
	5,77		1,44
	5,94		1,49
	6,17		1,54
0	3,06	-60	1,39
	2,88		1,31
	2,97		1,35
	3,09		1,40
-10	2,55	-70	1,28
	2,40		1,20
	2,48		1,24
	2,57		1,29
-20	2,18	-80	1,17
	2,06		1,11
	2,12		1,14
	2,20		1,18
-30	1,92	-90	1,09
	1,81		1,03
	1,86		1,06
	1,93		1,10
-40	1,70	-100	1,02
	1,61		0,96
	1,65		0,99
	1,72		1,03

продолжение приложения Б

Таблица Б.6 – Экспериментальные данные определения толщины стекла после моллирования в полусферическую форму

Глубина прогиба, h_i мм	Изменение толщины стекла x_i , мм	Глубина прогиба, h_i мм	Изменение толщины стекла x_i , мм
-0,001	6,12	-30	4,50
	5,77		4,24
	5,94		4,37
	6,17		4,54
-5	6,06	-35	4,11
	5,71		3,88
	5,88		3,99
	6,11		4,14
-10	5,89	-40	3,73
	5,55		3,52
	5,71		3,62
	5,93		3,76
-15	5,61	-45	3,38
	5,29		3,18
	5,45		3,28
	5,66		3,40
-20	5,27	-50	3,06
	4,97		2,88
	5,12		2,97
	5,32		3,09
-25	4,90		
	4,62		
	4,75		
	4,94		

продолжение приложения Б

Таблица Б.7 – Экспериментальные данные измерения глубины прогиба плоского стекла толщиной 6 мм при остаточном давлении в форме 0,1 и 0,09 МПа и фиксированных температурах

Время, с	Изменение глубины прогиба при температуре, мм и остаточном разряжении 0,1 МПа				Изменение глубины прогиба при температуре, мм остаточном разряжении 0,09 МПа			
	720°C	750 °C	780 °C	810 °C	720 °C	750 °C	780 °C	810 °C
0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0,5	0	0	1,3	3,6
90	0	0	0	0,6	1,1	3,4	5,6	10,3
120	0	0,6	1	2,4	7	11,1	17,8	30,6
150	0,8	1,7	2,1	3,7	16,5	24,7	31,8	42,7
180	1,5	2,7	3,6	5	29,8	35,5	41,4	53,9
210	2,1	4,3	5,2	7,1	35	43	47,2	59,4
240	3	5,4	6,7	8	37	47,2	54,5	65,6
270	4,8	7,2	9	11,1	44,5	50,6	58,5	68,3
300	5	7,8	10,4	12,4	47,6	54,7	62,2	74,5
330	6	10,3	11,7	15,8	48	56	65,8	78,3
360	6,8	10,4	14,4	17,8	50,6	59	69,5	80,6
390	8	11,7	15	21,7	50,6	60,3	73,3	84
420	9,2	13,8	17,8	25	53	63,2	74,5	85,7
450	9,4	13,9	19,2	26,5	53,1	64,6	77,9	85,6
480	9,5	15	20	29	54	65,2	78,3	86,3
510	10	16,5	22,5	30,4	54	66,2	80	—
540	10,2	17,3	22,8	31,6	54	67,7	81,7	—
570	10,2	17,3	25	33,2	54,1	70,2	84,5	—
600	10,5	19,3	26,4	34,3	54,1	68,9	83,5	—

продолжение приложения Б

Таблица Б.8 – Экспериментальные данные измерения глубины прогиба плоского стекла толщиной 6 мм при остаточном давлении в форме 0,08 и 0,07 МПа и фиксированных температурах

Время, с	Изменение глубины прогиба при температуре, мм остаточном разряжении 0,08 МПа				Изменение глубины прогиба при температуре, мм разряжении 0,07 МПа			
	720°C	750 °C	780 °C	810 °C	720 °C	750 °C	780 °C	810 °C
0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	1,3	5	0	0	2,3	7
90	2,2	5,2	8,3	16,4	2,2	6,1	13,6	26,7
120	7,3	14,5	24	35,6	10,5	19	27,8	39,5
150	22,3	27,3	34,7	49,2	24,8	30,2	38,5	51,4
180	30,7	38,3	44,4	58	32,7	40	47,1	59,6
210	36,6	44,9	51,6	62,7	39,8	46,4	54,4	66
240	42,2	50,5	57,6	68,3	44,8	52	58,8	72,3
270	44,5	52,7	60,5	73,5	47,3	54,8	64	75
300	48,8	55,8	65	77,6	50,6	57,6	69	78,6
330	49,4	58,5	70	79,3	51,5	62	71,8	82,5
360	52,6	62,4	72,4	82,6	53,9	63,3	75	84,1
390	52,6	64,6	75,5	84	52,7	67,6	79,1	85,3
420	53,7	65,2	77,9	85,8	56,3	68,9	80,5	85,7
450	55,7	67	80	85,6	56,4	70,6	82,8	86
480	56	70,2	81,2	86,3	56,8	73,3	83,7	86,2
510	55,2	71,7	84	—	58,9	73,7	84,7	—
540	55,6	71,3	85	—	59,4	74,9	85	—
570	56	72,4	84,5	—	58,8	76,5	84,8	—
600	55,7	73,9	85,3	—	60	76	85	—

продолжение приложения Б

Таблица Б.9 – Экспериментальные данные измерения глубины прогиба плоского стекла толщиной 6 мм при остаточном давлении в форме 0,06 и 0,05 МПа и фиксированных температурах

Время, с	Изменение глубины прогиба при температуре, мм разряжении 0,06 МПа				Изменение глубины прогиба при температуре, мм разряжении 0,05 МПа			
	720°C	750 °C	780 °C	810 °C	720 °C	750 °C	780 °C	810 °C
0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	1,7	0	0	1	2,4
60	0	1,6	4,9	7	1	3,9	7,2	19
90	5	9	20	31,7	8,6	14,2	26	37,1
120	15,5	24,4	35	48,7	23,6	30	40	52,4
150	27,9	34,8	45	56,5	33,1	42,9	50	62,6
180	37,6	44,7	52,3	65	42,6	50,2	55,7	70
210	41,6	49,8	60	72,4	47,7	53,6	62,2	76,8
240	47,8	55,2	63,7	75,1	50,2	59,8	67,6	80
270	49,8	59,6	68	80	55	62,9	73,4	83,2
300	54	61,1	73,6	84,1	56,2	65,3	76	85
330	55	65,6	75,9	85	59,3	67,6	80	86
360	57,4	66,6	80	86	60	70,2	82	86
390	57,7	70,2	81,8	86	62,6	74,4	84,1	86
420	59,6	72,2	83,6	86	62,7	75,2	85	—
450	59,8	74,2	85	85,9	64,8	77	85,1	—
480	60,7	75	85,2	85,9	64,9	78,7	85,3	—
510	62,9	78,5	—	—	67,1	80,2	85,2	—
540	62,5	79,1	—	—	67,6	82,9	85,4	—
570	64,6	79	—	—	67,5	83,1	85,4	—
600	63,4	80	—	—	67,7	84,7	85,5	—

продолжение приложения Б

Таблица Б.10 – Экспериментальные данные изменения глубины прогиба плоского стекла при фиксированных скорости нагрева стекла и остаточного разряжения в форме

Температура, °С	Остаточное давление в форме, МПа					
	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
580	0	0	0	0	0	0
590	0	0	0	0	0	0
600	0	0	0	0	0	0
610	0	0	0	0	0	0
620	0	0	0	0	0	0
630	0	0	0	0	0	0
640	0	0	0	0	0	1,3
650	0	0	0	1	1	2,1
660	1	2	3,1	4	6	8,9
670	1,5	3,9	6,3	8	12	19,4
680	2,2	8,6	10,9	13,5	19,6	32,4
690	4,2	13,3	16,9	23	32,1	45
700	6,1	20,7	26,1	32,9	42,4	52,8
710	8,5	31,7	36	45	53,3	65,6
720	10,3	40,4	45,2	54,2	61,3	68,1
730	12,1	50	54,7	60	66	74,7
740	14,6	56,8	61,2	66,4	72,5	77,8
750	18,2	63,5	67,7	72,7	76,3	81,7
760	20,2	69,6	72,4	75,9	81,2	83,6
770	23,6	76	77	80,4	82,8	85,4
780	26	80	80,7	83	84,8	86,1
790	29,3	83	83,7	84,8	86	86,1
800	32,2	84	85	85,8	86	86,1
810	34,6	85,5	86	86	86	86,1
820	38,6	86	86	86	86	86,1

продолжение приложения Б

Таблица Б.11 – Экспериментальные данные изменения концентрации абразивных частиц по толщине абразивного инструмента

Глубина замера, мм	Фракция абразива, мкм							
	120 - 160		80 - 120		40 - 80		10 - 40	
	Количество частиц шт. на см3							
	Сред нее	Экспе римент	Сред нее	Экспе римент	Сред нее	Экспе римент	Сред нее	Экспе римент
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	14,5	15	15,5	17	20	22	23	26
		16		18		18		21
		13		14		21		24
		14		13		19		21
10	21	20	23	23	31,5	33	38,5	37
		25		25		30		39
		26		21		28		37
		13		23		35		41
15	26	28	30,5	30	36	40	43,5	45
		24		31		32		48
		27		33		38		44
		25		29		34		37
20	29	30	31,5	33	42	45	50	55
		25		30		40		48
		28		28		41		52
		33		35		42		45
25	30	34	37,5	40	47,5	51	51,5	55
		28		35		44		43
		31		38		46		52
		27		37		49		56
30	35	38	40	45	50	53	53,5	58
		32		32				51
		35		44		56		55
		35		39		40		50
35	36,5	38	43,5	48	50,5	56	57	64
		34		43		50		50
		40		40		45		53
		34		43		51		61

продолжение приложения Б

продолжение таблицы Б.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	38	44	43	48	52,5	55	56,5	60
		32		47		49		49
		35		37		47		55
		41		40		59		62
45	38,5	40	46	50	52	57	58	64
		33		42		48		50
		36		46		51		52
		45		46		52		66
50	39	43	46,5	48	53,5	59	57	64
		30		42		48		53
		32		45		50		52
		53		51		57		59

Таблица Б.12 – Экспериментальные данные изменения относительного светопропускания от прилагаемого к инструменту усилия

Усилие, Н	Светопропускание, %		Усилие, Н	Светопропускание, %	
	Эксперимент	Среднее		Эксперимент	Среднее
20	65	67	26	72	69
	69			66	
	68			65	
	66			73	
22	66	67	28	73	69
	70			64	
	67			69	
	65			70	
24	69	68	30	72	70
	70			78	
	65			62	
	68			68	

продолжение приложения Б

Таблица Б.13 – Экспериментальные данные изменения относительного светопропускания образцов от амплитуды вибрации инструмента

Амплитуда, мм	Светопропускание, %		Амплитуда, мм	Светопропускание, %	
	Эксперимент	Среднее		Эксперимент	Среднее
0,5	62	66	0,8	69	69
	70			61	
	61			72	
	71			74	
0,6	65	68	0,9	65	67
	71			70	
	66			63	
	70			70	
0,7	63	67	1	72	68
	65			71	
	71			63	
	69			66	

Таблица Б.14 – Экспериментальные данные изменения относительного светопропускания образцов от частоты вибрации инструмента

Частота, Гц	Светопропускание, %		Частота, Гц	Светопропускание, %	
	Эксперимент	Среднее		Эксперимент	Среднее
6	64	65	14	69	69
	68			71	
	65			63	
	63			73	
8	68	66	16	72	70
	65			69	
	70			72	
	61			67	
10	70	69	18	70	69
	72			65	
	66			73	
	68			68	
12	70	68	20	75	70
	72			67	
	64			68	
	66			70	

продолжение приложения Б

Таблица Б.15 – Экспериментальные данные изменения относительного светопропускания образцов от времени обработки

Время, с	Светопропускание, %		Время, с	Светопропускание, %	
	Эксперимент	Среднее		Эксперимент	Среднее
1	62	61	120	73	71
	61			70	
	60			66	
	61			75	
20	64	63	140	75	71
	62			72	
	60			70	
	66			67	
40	66	64	160	74	70
	60			76	
	64			68	
	66			62	
60	68	66	180	73	71
	64			66	
	65			74	
	67			71	
80	70	68	200	75	71
	65			68	
	68			71	
	69			70	
100	72	68			
	63				
	66				
	71				

Приложение В
Список патентов



Рисунок В.1 – Патент №2607541 «Способ вакуумного моллирования и
устройство для его реализации»



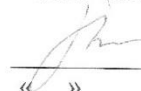
Рисунок В.2 – Патент № 2796330 «Способ определения вязкости стекла»



Рисунок В.3 – Патент № 2804708 «Способ абразивной обработки рельефной

Продолжение приложение В

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Соляной городок»

 Т.А.Ковалева
« » 2024 г.
г. Санкт-Петербург

А К Т

использования результатов диссертационной работы
Козицына Ивана Петровича

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОЛЛИРОВАНИЯ ЛИСТОВОГО СТЕКЛА
В ВАКУУМНУЮ ФОРМУ С ЗАКРЕПЛЕННЫМ КРАЕМ**

Комиссия в составе:

Председатель: Т.А.Ковалева – генеральный директор ООО «Соляной городок»

Члены комиссии:

Р.Е.Поздняк – начальник производства ООО «Соляной городок»;

П.Н.Бокова – генеральный конструктор ОАО «Русвуздизайн»

Составили настоящий Акт о том, что результаты диссертационной работы Козицына Ивана Петровича «Разработка метода моллирования листового стекла в вакуумную форму с закрепленным краем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в виде научно-технологической базы техническим отделом ООО «Соляной городок» при изготовлении изделий из листового стекла технического и художественного назначения.

Данный подход к изготовлению изделий актуален и технологически оправдан.

Председатель комиссии

Члены комиссии



Т.А.Ковалева

Р.Е.Поздняк

П.Н.Бокова