

ДЕП

2003

Труды Государственного
Научно-Исследовательского
Института стекла

**Сборник
работ
теплотехнической
лаборатории
1933 года**

1935

Гизлегпром
Москва — Ленинград

Пр. 1939 г.

Государственное
издательство
ЛЕГКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Verhandlungen
des Staatsinstituts
für Glasforschung*

*ARBEITEN
DES WÄRMETECHNISCHEN
LABORATORIUMS 1933*

1935

Moskau

Труды государственного
научно-исследовательского
института стекла

**Сборник
работ
ПО ТЕПЛОТЕХНИКЕ**

ПОС. 1935
1/282152

1935
Гизлегпром
Москва—Ленинград

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

Введение ¹

1. Теплотехнические процессы в стекольной промышленности

Термические операции в производственном процессе стекольной промышленности являются основными этапами, определяющими физико-химическое состояние стекла как материала и обуславливающими окончательное качество изделий. Вместе с тем и тепловые установки, в которых эти процессы происходят, представляют наиболее солидные и фундаментальные сооружения, стоимость которых с различными органически связанными с ними устройствами (генераторное хозяйство, котлы или сушила на отходящих газах, нефтяные баки, гончарный цех и др.) в новейших крупных заводах, вместе с соответствующей частью здания, являются преобладающим капиталовложением при постройке (35—40%). Естественно, что и в калькуляции себестоимости единицы продукции амортизационные отчисления занимают весьма солидное место, определяя абсолютное значение стоимости изделия (14—18% заводской себестоимости).

Кроме того тепловые процессы, происходящие в указанных установках, требуют весьма значительного расхода тепловой энергии (0,8—0,9 кг условного топлива на 1 кг стекломассы), в особенности сама варка стекла, так что эксплуатационные затраты на топливо составляют крупную статью в себестоимости производства. В силу ряда причин, о которых будет сказано ниже, современные стекловаренные печи представляют собой неэкономичную установку, коэффициент полезного действия которой при широком промышленном применении не превышает 10—15%, так что 85—90% затраченной тепловой энергии, как правило, не используется; при этом расход топлива только на процесс стекловарения составляет не менее 15—20% всех производственных затрат. Если же учесть еще и операции отжига и стоимость ремонтов тепловых установок, разрушающихся под действием высоких температур (непосредственно и расплавленной стекломассой), а также коэффициент полезного действия генераторной станции, обычной в условиях работы стекольного завода, то получается значительно более серьезная энергетическая затрата, удельный вес которой в общем топливном балансе страны не может быть

¹ Все работы, помещенные в этом сборнике, проведены на основе применения методологии и новейшей аппаратуры, изобретенной проф. В. Э. Бромлей.

не принят во внимание. Это же обстоятельство должно всемерно стимулировать исследовательскую и практическую работу в направлении сокращения непроизводительных потерь тепла и всемерного снижения его разрушительного действия, заметно сказывающегося при тех высоких температурах, которые имеют место в процессе варки.

Отсюда вытекает, что изучение теплотехнических процессов и установок, в которых последние протекают, а также методов применения топлива является весьма актуальным в области стекольного производства. С этой точки зрения работа теплотехников на местах и исследовательская работа Ин-та стекла приобретают большое значение и должны быть в первую очередь направлены на узловые вопросы данной области: повышение к.п.д. тепловых установок и надлежащее сочетание процессов теплотехнических с технологическими операциями в производстве.

II. Основные направления в развитии теплотехнических установок

Исходя из указанного, можно наметить главные линии, по которым должна проходить творческая мысль теплотехников-стекольщиков. В первую очередь необходимо на основе всестороннего и объективного анализа действующих установок наметить пути, которые должны привести к повышению к.п.д. печей и других связанных с ними тепловых установок (генераторы, котлы, сушила и пр.). Во-вторых, учитывая основные тенденции современной техники, надо осуществить всемерную механизацию хотя бы основных типов процессов. При этом вытекающее, как правило, из усвоения механизации повышение производительности и мощности агрегатов также будет сопровождаться параллельным увеличением к.п.д. действующих установок. Однако здесь не следует исключительно иметь в виду благоприятное соотношение между производительностью печей и удельным расходом топлива; известно, что кривая расхода топлива в этом случае напоминает гиперболу, отнесенную к асимптотам, на которых отложены на одной — производительность, а на другой — удельный расход топлива. При эксплуатации печей встречается целый ряд других техно-экономических факторов, наиболее выгодное сочетание которых может не оправдать этой тенденции. В качестве примера можно привести общую установку Фурко на 10 машин, в настоящее время в Союзе на нескольких заводах они приспособлены к питанию 11 и даже 13 машин и дают более экономичные показатели по расходу топлива. Однако из этого не вытекает целесообразность дальнейшего увеличения числа машин, правильная и экономическая эксплуатация которых при этом нарушается (явление неблагоприятной схемы потоков, усложнение в обслуживании и т.п.). Поэтому часто один теплотехнический фактор не в состоянии решить вопрос там, где он переплетается с рядом других факторов.

В-третьих, имея в виду методы отопления и обогрева совре-

менных печей, необходимо в корне пересмотреть конструкцию этих печей, так как промышленный опыт и теоретические изыскания показывают, что дальнейшее увеличение к. п. д. печи, делающее ее эксплуатацию более рентабельной, упирается в несовершенный метод обогрева. Действительно, в стекловаренных ваннах печах, являющихся главными потребителями тепла и основными производителями стеклянных изделий¹, съём стекломассы, или продуктивность их, зависит от теплового напряжения 1 м^3 газового пространства, приходящегося на 1 м^2 площади, поскольку стекломасса обогревается односторонне. Беря максимальное напряжение $350\,000\text{--}450\,000 \text{ кал/м}^3/\text{час}$, получаем лимит тепла на 1 м^2 поверхности, причем усвоение (восприятие) этого количества тепла тормозится инертностью стекломассы, ее малой подвижностью (вязкостью) и малым коэффициентом теплопроводности, являющимся здесь сложным (теплопередача через жидкую среду — теплопроводность и лучеиспускание). Данные глубинного пирометража показывают, что и первый и второй коэффициенты невелики и уменьшаются с понижением оптической прозрачности стекломассы. Так как дальнейшее повышение температур нагревающих газов, увеличивая подвижность частиц стекломассы, однако не в состоянии пропорционально повысить теплопередачу внутрь слоя, то, следовательно, нельзя использовать этот фактор, не говоря уже о том, что высокие температуры могут быть опасны с технологической точки зрения и, кроме того должны значительно увеличивать стоимость материала печи.

Отсюда становятся ясными попытки ряда авторов реорганизовать в корне процесс варки, отказавшись от одностороннего нагрева. Такие отдельные попытки, еще не оформившиеся в законченные производственные установки, в значительном количестве имели место за последние 5—10 лет. Из них следует указать на печь Фергюссона, появившуюся в 1921 г. и представляющую собой шахтную печь, где шихта должна была плавиться в виде пыльников или крупинок в пламенном вихре и довариваться в особом бассейне, и затем на электрическую печь Саважона, использующую тепло Джауля и стекломассу в качестве проводника. Шахтная печь Кюнцеля и вращающаяся печь Цотоса представляли собой смелую пробу использования совершенно чуждых стекольной промышленности типов печей (по опыту других отраслей силикатных производств), причем в случае благоприятного разрешения вопроса к. п. д. этих установок был бы значительно выше, чем у обычных стекловаренных печей. Далее следует указать на печь диффузного горения Вильямса, применяющего для обогрева стекломассы несветящееся пламя, радирующее инфракрасные, наиболее интенсивные тепловые лучи, что дало ему возможность в опытной установке получать значительно большую удельную производительность.

¹ Ко второй пятилетке соотношение продукции ваннах печей в Союзе к продукции горшковых составляет 80 : 20; во второй пятилетке это соотношение еще больше.

Наконец в настоящее время Ин-том стекла проводятся работы по конструированию печи системы проф. И. И. Китайгородского, представляющей собой установку для активированной плавки во взвешенном состоянии. Кроме того проф. В. Э. Бромлей в текущем году заканчивает предварительный проект электровакуумной печи, представляющей собой дальнейший этап в деле использования эффекта Джауля и вакуума, комбинированное действие которых в теплотехническом и технологическом направлениях должно обусловить получение более совершенной стекловаренной печи. Касаясь вопроса об электроплавильных печах, вообще следует указать, что, по существу, учитывая путь, пройденный техникой от Саважона через Редера и Корнелиуса¹, проблема электрической стекловаренной печи тесно связана с проблемой экономики и частично материалов (электродов), поскольку стоимость kвт/ч определяет сравнительную рентабельность данного процесса.

В области отжигательных печей за последние 10 лет за границей были достигнуты весьма крупные успехи в направлении уменьшения удельного расхода топлива. Поэтому между теплотехнической характеристикой лера «Симплекс», привезенного в Союз в 1925 г., и отжигательными печами, введенными недавно (Владикавказский завод), заметна резкая разница в пользу современного типа печей. Последние сконструированы целиком из металла и построены по принципу идеального распределения конвекционных токов, причем движение газов принудительное, с разжижением наружным воздухом. Удельный расход топлива в лерах «Симплекс» — 700—1000 kкал на 1 кг отоженных изделий, в то время как современные (лер Гартфорда) дают 80—100 kкал/кг . В настоящее время эти вновь введенные установки перепроектировываются применительно к наличию в Союзе дорогостоящих огнестойких металлосплавов (высокохромистые стали).

Таким образом, на основании сказанного, повышение к. п. д. печных и других тепловых установок означает дальнейшее усовершенствование их в целом и, приводя к уменьшению удельных тепловых расходов на единицу продукции, снижает их общую себестоимость. Вместе с тем из вышеприведенного вытекает, что повышение к. п. д. осуществляется по различным направлениям:

- 1) увеличение производительности;
- 2) усовершенствование метода варки (многосторонний обогрев);
- 3) уменьшение потерь.

Последнее направление, связанное, с одной стороны, с природой и качеством огнеупорного материала, применяемого при постройке печи, зависит, с другой стороны, от методов и степени использования отходящего тепла.

Вопрос об огнеупоре не является чисто теплотехническим, но с точки зрения теплопроводности и газопроницаемости природа

¹ Известны еще попытки сконструировать дуговые электроплавильные печи для варки стекла (Мец, Бронн) и печи с кристоловым сопротивлением. Однако печи эти горшковые и по ряду причин не могут рассчитывать на широкое промышленное применение (расход тока — 1,3—2 kвт/ч на 1 кг стекломассы).

огнеупора непосредственно участвует в оформлении величины удельного расхода топлива. На основе анализа физических свойств обычного стеклоприпаса — шамотного бруса — можно указать, что одно только изменение величины пористости его в пределах от 20 до 26% определяет колебание в 20% проходящего через них тепла, а так как в обычной печи, например 30-метровой ванне Фурко, через этот припас проходит 50% всего тепла, то уже увеличение пористости шамота на 6% дает заметный экономический эффект. Газопроницаемость определяет в связи с гидравлической характеристикой газов, движущихся в печной системе, также заметные потери, могущие быть учтенными методами рационального теплотехнического контроля.

В такой же мере следует учитывать и изоляцию теплоотдающих поверхностей, что может дать еще повышение теплотехнического к. п. д. на 8—12%. Но здесь вопрос осложняется устойчивостью самого припаса при высоких температурах и строительно-конструктивными соображениями.

Что же касается использования отходящего газа, то следует поставить этот вопрос перед котлостроительными организациями Союза и совместно выработать необходимый для советских ванн печей тип котельной установки. До сих пор ни на одной ванной печи Союза не установлены ни котлы на отходящих газах (Abhitzkessel), ни другие приборы по использованию тепла, теряемого с отходящими газами и через поверхности стен, если не считать отдельных попыток использовать тепло дыма для сушки песка, или тепло воды из холодильников для разных мелких целей.

Генераторные станции для целей стекольной промышленности по существу не являются вообще специфическими, так что проблема газификации топлива и конструкции генератора не является задачей только данной отрасли народного хозяйства. Однако в условиях Советского союза, обладающего крупнейшими в мире торфяными и лесными богатствами, в эксплуатации которых стекольная промышленность занимает в качестве промышленного потребителя одно из первых мест, именно она и является весьма заинтересованной в проблеме газификации торфа и дров и должна взять на себя и разрешение ее. Естественно, что такая крупная задача должна разрешаться с привлечением и других организаций (Инсторф, Теплотехнический ин-т и др.).

Несколько особняком стоит вопрос о методах исследования и контроле процессов, однако косвенно он имеет отношение и к повышению к. п. д. установок, поскольку при помощи его устанавливается наличие факторов, обуславливающих физико-химическую обстановку процесса. С этой точки зрения иностранная техника становится на путь автоматического контроля и регулирования теплотехнических процессов, значительно, рационализируя обслуживание генераторов печей и других тепловых установок. В Советском союзе вопросы контроля поставлены на очередь.

В части новых методов исследования Советский союз не явля-

ется отсталым, и в частности Ин-т стекла в 1933 г. в своих теплотехнических исследованиях использовал вполне оригинальную аппаратуру, сконструированную проф. В. Э. Бромлеем, дающую возможность детального анализа факторов теплотехнических процессов. Таковы прибор для сквозного пирометража, впервые использованный в работе изучения лера «Симплекс», прибор для глубинного пирометража стекломассы, для взятия проб стекла на глубине, поверхностный «шуп» для определения «горячих» пятен на поверхности (Quellpunkt), прибор для изучения факела и др.

С точки зрения методов и орудий исследования, на основе литературных данных следует полагать, что Советский союз опередил границу, и на текущий год Ин-том стекла запроектировано дальнейшее построение, совершенствование и внедрение в промышленность уже опробованных приборов.

III. Работы ГЭИС в области теплотехники

В силу ряда причин фактическая работа теплотехнической лаборатории ГЭИС началась в середине 1932 г., и первая серия исследований проводилась по заданию отдельных заводов и трестов. Таковы работы по изучению теплового режима лера «Симплекс» (Сергиевский стеклозавод), по изучению распределения температур в самой стекломассе в ванне Ухановского завода (Москва) и наконец изучение теплового режима ванны Фурко с перешейком (Зеркалокомбинат). Первая работа имела своей целью выправить режим, определявший значительный процент брака; в результате изучения процент брака был снижен вдвое. Вторая работа, в сочетании с технологическим изучением на основе анализа глубинных проб стекломассы (прибор проф. В. Э. Бромлея), должна была осветить вопрос ликвации в свинцовых стеклах и параллельно выяснить схему изотерм в стекле, обусловленных формой бассейна и режимом варки.

Следующие работы — теплотехническое изучение системы Фурко чехо-словацкой конструкции, изучение теплового режима ванны типа «Торпедо» (ОСЗ) — преследовали цели рационализации конструкции. В частности работа по изучению машины Фурко чехо-словацкой системы являлась частью материала по сравнению изучению систем Фурко вообще с целью решения вопроса о выгодах применения той или иной системы и выяснения производительности их. Вместе с тем эта работа дала определенные выводы по вопросу о рациональном расположении машин в цеху и тепловых условиях их работы.

Изучение ванны «Торпедо» в качестве типичной установки даст предпосылки к дальнейшему конструированию ванны и освещает вопрос о влиянии на режим отдельных конструктивных особенностей печи. С этой точки зрения интересна и работа по изучению ванны Фурко с узким перешейком; на основе результатов определенно выяснилась нецелесообразность подобного устройства при выработке стекла широкими лентами.

Сравнительное изучение фидеров систем Прехта и Миллера имело своим непосредственным результатом улучшение и стабилизацию режима в фидере, что является основной предпосылкой к рациональному механизированному производству.

На 1934 г. поставлены работы, преследующие цель расширения топливной базы — применение влажных топлив и пылевидного. Последний тип топлива, являясь широко распространенным в Западной Европе и Америке в топочной технике и в других отраслях промышленности (цементные вращающиеся печи и др.), не применялся для отопления стекловаренных печей, так как затруднение, которое порождалось этим методом (засорение стекломассы золой), не перекрывалось теплотехнико-экономическими преимуществами пылевидного топлива в условиях капиталистического хозяйства (соотношение цен на разные типы топлива). У нас же при колоссальном торфяном богатстве и методе его добычи (фрезерный торф) это горючее представляет дешевый энергетический ресурс, освоение которого позволит освободить ценное топливо (уголь, нефть) для экспорта и других отраслей, где оно является технологически необходимым (металлургия). То же следует сказать и о газификации влажного топлива, которым теперь пользуется стекольная промышленность; необходимо дать рациональные методы его применения.

Далее следуют темы, имеющие целью усовершенствование теплового режима печных установок: изучение типичных регенераторов при ванне системы Фурко, изучение рекуператоров, которое важно с точки зрения внедрения этой установки в стекольную промышленность в Союзе. В западной технике рекуперативные стекловаренные печи являются обычными, в то время как у нас они до сих пор не привились; целью работы является выработка рациональной конструкции и подбор соответствующих материалов. Другие работы направлены в сторону повышения к. п. д. печных установок, — применение обогащенного кислородом воздуха, конструирование электровакуумной печи системы В. Э. Бромлея и печи активированной плавки системы проф. И. И. Китайгородского. Применение обогащенного воздуха (25% O_2) обуславливает повышение производительности во времени и на единицу поверхности, т. е. ведет к уменьшению удельного расхода топлива. Эта проблема характерна для системы нашего хозяйства, при которой освобождающееся при централизованном крупном производстве синтетического аммиака большое количество кислорода может быть рентабельно использовано при теплотехнических установках (печи, генераторы).

Электровакуумная печь осуществляет рациональное применение дешевой электроэнергии при комбинации с вакуумом, форсирующим технологические стадии процесса. Исходя из величины к. п. д. в 65%, характеризующей работу электроплавильных печей (Редер, Корнелиус), следует ожидать в данном случае весьма эффективных результатов.

Печь системы И. И. Китайгородского также должна привести к многократному возрастанию производительности и снижению

удельного расхода топлива в условиях пользования обычными горючими.

Кроме того по линии контроля процессов и их исследования предположено дальнейшее усовершенствование специальной измерительной аппаратуры и создание новой, позволяющей быстро и удобно наблюдать за основными узловыми факторами, от которых зависят ход, направление и интенсивность процесса варки или отжига стекла. Насколько эта сторона вопроса имеет важное значение, можно иллюстрировать примером: электроплавильная печь системы Корнелиуса все же дает мошку, и если бы при выработке конструкции своей печи и опытах с ней Кюрнелиус обладал орудиями глубинного зондажа стекломассы, он мог бы сделать соответствующие выводы конструктивного характера, увеличив объем жолоба, в котором процесс осветления не успевал доходить до конца.

На ближайшее будущее, в пределах второй пятилетки, по линии теплотехнических исследований необходимо поставить работы по усовершенствованию конструкции печей в направлении сокращения размеров их, по повышению производительности установок, что частично неизбежно вытекает из производящихся работ по электроплавке и варке во взвешенном состоянии. Исходя из специфических условий энергохозяйства Союза, следует считать, что электропечи представляют собой одну из совершенных форм будущих стекловаренных печей, которые, обладая высоким к. п. д. (не меньше 65%), удобно сочетаются с общим планом электрификации промышленности Союза. То же следует сказать и о варке во взвешенном состоянии, удачное разрешение которой поставит нас на первое место в мировой стекольной промышленности и значительно облегчит расширение стекольного производства.

Эти задачи в свою очередь повлекут за собой ряд смежных проблем в области производства огнеупорных материалов специального назначения, предпосылками чего служит развитие за границей фабрикаций, силлиманитовых, муллитовых брусьев и т. п., используемых сейчас в стекловаренных печах. Рекордные удельные съемы стекла с единицы площади, даваемые заграничной техникой (1000 кг/м^2 и даже до 2000 кг/м^2), по существу будут превзойдены при способе активированной плавки, поскольку такие печи не будут связаны с большими площадями бассейнов, а интенсивный процесс теплопередачи позволит многократно (во времени) повысить суточную производительность установки.

Другая серия работ должна быть направлена на качественное улучшение механизированного производства в направлении стабилизации теплового режима, лучшего согласования с технологией процесса, с методом питания и физико-химическими условиями среды (потоки стекломассы). Этот вопрос за границей разработан в настоящее время более совершенно, так что например явление полостности стекла, полученного по методу Фурко, встречается редко. В связи с грядущим резким расширением номенклатуры изделий, получаемых механизированным способом, и освоением

новых механизмов и методов выработки неизбежно изучение их в целях получения высоких качественных результатов.

Кроме того необходимо обратить внимание промышленности на выработку и освоение методов автоматического контроля теплотехнических процессов. В этом смысле, используя уже имеющуюся оригинальную исследовательскую аппаратуру Ин-та, стекольная промышленность сумеет достигнуть высокого технического уровня.

IV. Освоение промышленностью работ Института

За сравнительно короткий срок Ин-т стекла все же сумел в области теплотехники достаточно близко подойти к нуждам промышленности, решить некоторые поставленные ею задачи, найти новые методы исследования и осветить ряд вопросов, до сих пор еще остающихся не решенными и исследователями зарубежных ин-тов. В этом смысле работы Ин-та стекла были несомненно актуальны, и следует считать целесообразным достаточно широкое внедрение их в промышленность.

Стекольной промышленности необходимо в течение второй пятилетки успешно провести реализацию тех работ и исследований, которые для нее разрешались Ин-том и которые должны еще в большей мере помочь нам осуществить лозунг «догнать и перегнать» капиталистическую технику в возможно короткий срок.

Проф. М. Г. Степаненко

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ ТОРПЕДНОЙ ПЕЧИ (ПЕЧЬ ГЭИС) ТИПА «ТОРПЕДО»

1. Цель и задачи изучения

Рациональное конструирование стекловаренных печей должно опираться на 2 основных предпосылки: обуславливать возможность получения необходимого технологического процесса и сопровождаться минимальным расходом топлива. Первое условие осуществляется во всех работающих печах, что же касается второго, то разнообразная техно-экономическая характеристика работы отдельных стекловаренных печей свидетельствует о том, что четких показателей тепловой работы этих печей еще до сих пор не существует. Отсюда возникает необходимость создать теплотехнические характеристики типовых установок, которые позволили бы нормализовать тепловой режим работы печей. Связь этих характеристик с конструкцией обусловит возможность отыскания новых конструктивных форм печей, работающих более экономично.

В качестве объекта данного исследования была выбрана печь Опытного стекольного завода, являющаяся типичной для торпедных ванн.

Поскольку такие печи (с перешейком) с горелками по Сименсу-Дралле на нефтяном отоплении являются достаточно распространенными в стекольной промышленности, обслуживая ряд производств (электроколбы, посуда, прессовые изделия и т.п.), их характеристика представляет определенный промышленный интерес, и выводы по такому изучению могут лечь в основу дальнейшего проектирования.

Кроме такой непосредственной задачи данное изучение ставило себе еще и другие цели методологического характера. Дело в том, что до сих пор вопросы методики теплотехнического изучения газовой (пламенной) среды в ваннных печах и рациональной для данных целей аппаратуры не нашли себе еще окончательного разрешения. В различных случаях применяют те или иные методы, причем сравнение их подчас является затруднительным, поскольку и метод и аппаратура в отдельных случаях имеют принципиаль-

¹ Работа проведена сотрудниками теплотехнического отдела ГЭИС инж. То-машевич И. О., Соколовым Н. С., Солиновым Ф. Г., Полик Б. М. и Михайловым Б. С.

ное отличие, мешающее в силу сложности тепловой обстановки непосредственному сравнению; в наибольшей мере это относится к температурным измерениям, почему до сих пор мало доверяют абсолютным значениям температур. Имеющиеся в нашей и иностранной литературе работы по анализу теплового режима печей по этим причинам не могут быть прямо сравнимы, что делает невозможными какие-либо выводы общего характера. Что же касается анализа температур в стекломассе, то тут имеется еще менее данных, и поэтому применение новой и оригинальной аппаратуры проф. В. Э. Бромлея, уже неоднократно использованной в работах Ин-та стекла, давало возможность получения ценного материала в этом направлении.

Поэтому в данной работе предположена была известная методологическая разработка вопроса: способы измерения и аппаратура, наиболее отвечающая условиям измерения как в газовой зоне, так и в стекломассе.

Литературные сведения по характеристике теплового режима ванн печей (газового пространства и стекломассы) не отличаются обилием и, как правило, освещают отдельные стороны вопроса.

Так исследование Германского стеклового о-ва¹ (WBG) давало характеристику горшковых и ванн печей по общим показателям. Работы Иохима² и Эккерта³, а также Гельгофа, Шнелкютца и Томаса⁴ дают уже гораздо больше разнообразных данных, относящихся как к тепловой характеристике газовой зоны, так и стекломассы, причем типы печей были различны. Таким образом имеются сведения о влиянии распределения температур печного пространства на температуры в самой стекломассе. Однако полной характеристики теплового режима ванн печей⁴ и связи конструкции их с условиями теплоотдачи не имеется. Это обстоятельство и обусловило настоящее исследование, имеющее целью дать освещение наиболее важным зависимостям между теплотехническим режимом печи типа «Торпедо» и поведением стекломассы.

II. Программа исследования

На основе указанного программа исследования включала изучение горелок, газового пространства ванны и теплового режима стекломассы.

Изучение горелок имело целью исследовать изменение температур по ходу газа, выяснив роль горелки данного типа в регенерации тепла, что важно, поскольку работа (тепловая) горелок отражается на режиме печи. Анализ дыма и измерение

¹ WBG, Горшковые и ванн печи, под ред. проф. Г. Маурах.

² Иохим, Тепловой режим стекловаренных печей, 1930.

³ Эккерт, Современные конструкции стекловаренных ванн печей.

⁴ Томас, Потоки и температуры в ванн печах—Гельгоф, Шнелкютц
Glast. Ber, 1931, № 1.

гидродинамики газов позволили бы судить о степени плотности (газопроницаемости) стен и сопротивлений по ходу в ней газов и сделать выводы о рациональной конструкции как самой горелки, так и ее стенок. Кроме того здесь ставится и методологическая задача — измерение температур в условиях переменного теплового режима с использованием обычной аппаратуры, поэтому здесь предполагено измерение температур комбинированным способом — термопарой и оптическим пирометром.

Изучение газового пространства должно дать схему распределения температур во времени и в пространстве обоих бассейнов печи, что определило бы характер явления горения и конфигурацию факела пламени при данном режиме. Кроме того анализ газа и измерения давления (положительного или отрицательного) уточнит фотографию процесса горения и свяжет развитие пламени, распространение горения и теплоотдачу с характерными элементами печной конструкции. Исходя из различия требований, предъявляемых варочным и выработочным бассейнами к температуре и состоянию газовой среды, указанное направление исследования должно дать материалы для суждения о правильности теплового режима и целесообразности конструкции как всей ванны, так и отдельных ее составляющих.

Изучение теплового режима стекломассы прежде всего разрешает основные проблемы распределения тепла и температуры в стекломассе в зависимости от состояния газовой среды, конфигурации бассейнов, положения и конструкции перешейка. Так как потоки в стекломассе определяются двумя причинами — выработкой стекла и разностью температур, то естественно, что данный этап работы позволит вскрыть или наметить их схему, от характера которой будет зависеть вывод о целесообразности как теплового режима, так и конструкции бассейна. Эта часть работы по существу является заключительной, потому что определяет характер и поведение стекломассы, поступающей в фидер. Кроме того с точки зрения последовательности процесса состояние стекломассы является уже результатом и следствием воздействия на нее как теплового режима газовой зоны, так и конструкции бассейна. Поэтому представляется возможным связать причины со следствиями и сделать выводы и воспроизведению наиболее целесообразного процесса стекловарения в печах данного типа с точки зрения теплотехнического режима.

III. Методы исследования

В связи с различием физической природы изучаемых пространств предполагена разная аппаратура и методика исследования.

Горелки изучаются главным образом с точки зрения характеристики протекающих в них газов, причем приняты во внимание как пространственные координаты, так и изменения во времени. Состояния газов изучаются на пограничных участках — вход и выход газа — в течение двух отдельных полупериодов.

Частота наблюдений—через 3 мин.; пограничные характеристики берутся средние—в середине полупериодов, от ряда отдельных циклов наблюдений. То же относится и к анализу газов и разрежениям. Температура измерялась обычными термопарами (Pt—PtRh) в тонкой фарфоровой оболочке и оптическим прибором (Ругорто), которые визируются на внутренние стенки горелки и на специальный тонкий шамотовый диск, перемещаемый по сечению горелки и по ходу газов в ней. Поверхностные температуры измерялись железно-константовым «щупом» (с точностью 10°).

Газовое пространство бассейна разбивалось на пространственную сетку, в узлах которой должны были быть измерены температура, состав и давление (или разрежение) газов. Исходя из конкретной возможности, было взято 5 поперечных и 3 продольных сечения, определивших 11 вертикальных линий измерения. По высоте или по глубине (считая юг свода) намечались 4 горизонта—0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 м (глубже опускать не позволяла ограниченная длина пирометрических трубок). Таким образом получилось всего 44 точки, в которых указаны характеристики измерения через каждые 6 мин., т. е. 5 доказаний в течение каждого полупериода (огонь справа, огонь слева). При стабильности теплового и производственного режима в ванне (одинаковая температура в контрольных точках, регулируемый расход топлива, одинаковая загрузка и выработка) являлось возможным охарактеризовать состояния отдельных горизонтов и сечений газовой среды. Температура измерялась платино-платиновыми термопарами в специальных тонких чехлах с значительно пониженной инерцией и оттоком тепла по жезлу. Метод контрольных измерений с дисками в газовом пространстве ванны не удалось осуществить из-за отсутствия толстой нихромовой ленты, необходимой для поддержки дисков в течение испытаний. Газовый анализ проводился обычным путем (газоанализатором).

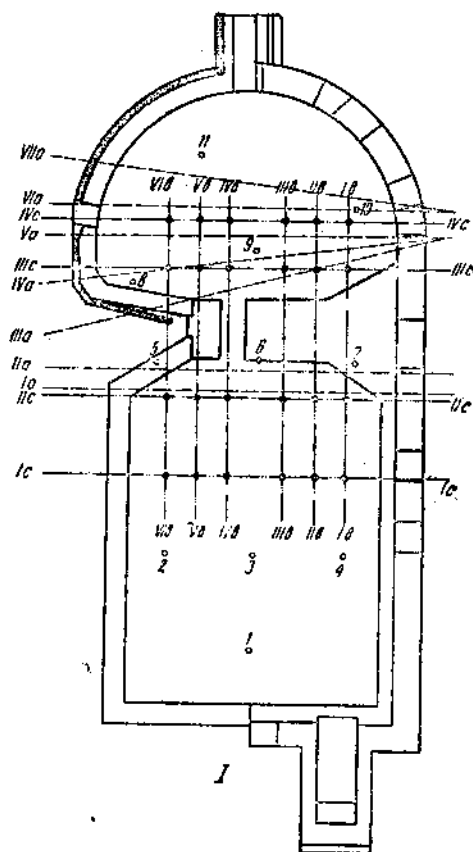


Рис. 1. План печи Торпедо (ГЭИС) с указанием вертикальных измерений.

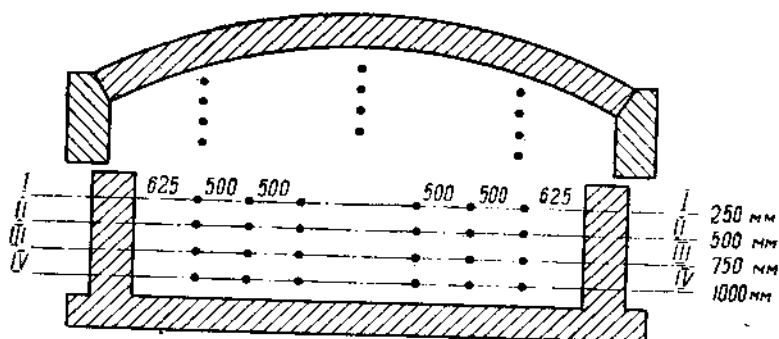


Рис. 2. Поперечный разрез бассейна с указанием плоскостей измерения.

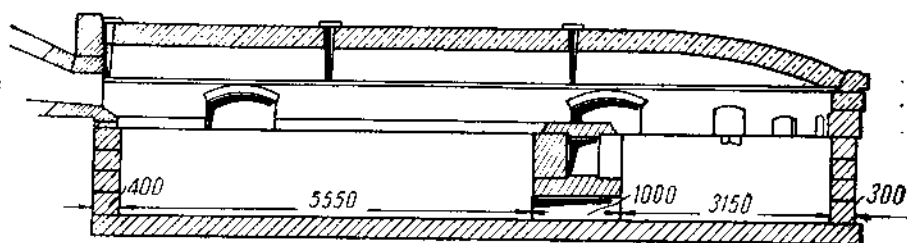


Рис. 3. Продольный разрез ванной печи.

заторм Орса) так же, как и измерение давления (тяги-мером Крелля).

Тепловой режим стекломассы изучался двояким путем. Поверхностное распределение температур изучалось «поверхностным щупом» системы проф. Б. Э. Бромля, на двух горизонтах — 2 и 12 см под уровнем стекла, а глубинное — глубинным пирометром (того же автора) дугообразной формы, уже примененным в нескольких работах Ин-та. Считаясь с расположением, формой, размерами и количеством окон, поверхностный щуп вводили с одной стороны, через 2 окна, что позволило промерить 2 «луча» в варочной и 5 «лучей» в выработочной части ванны. Учитывая усиленное влияние температур газовой среды на поверхностные слои стекломассы, каждый «луч» измеряли при двух положениях факела (огонь справа — огонь слева). Частота точек — через каждые 0,2 м по горизонтальному направлению.

Глубинный пирометраж проводился по несколько суженной программе, поскольку приспособления для выпуска стекла стесняли работы с прибором по обеим сторонам ванны. Кроме того наиболее интересной зоной являлись области бассейна у перешейка, с точки зрения схемы потоков, уходящих в перешеек, и локализация «Quellpunkt'a». Всего было измерено 68 точек, расположенных на 17 вертикалях и 4 горизонтах (через 0,25 м).

В результате намеченной программы исследования можно связать тепловое состояние газа и стекломассы, их взаимное влия-

ние и выяснить относительную картину теплопередачи в печи; глубинный же и поверхностный пирометраж позволил обнаружить схему основных потоков, обусловленных данным температурным режимом и конструкцией перешейка и тем самым определить степень целесообразности общей конструкции ванны.

На рис. 1, 2 и 3 даны разрезы изученной ванны; на них нанесены пункты установки приборов.

IV. Результаты исследования

А. Работа горелок

Изучение горелок было разделено на два этапа: первый этап — фотография существующего режима в печи и второй этап — анализ и налаживание. Фотография существующего режима печи показала, что печь работает неравномерно и что необходимо в целях получения по работе выводов общего характера изменить режим ванны. Результаты предварительного испытания показали, что регенераторы работали крайне неравномерно, вынуждая устанавливать разные периоды переключения клапана. Правая насадка медленнее нагревается и быстрее охлаждается, чем левая, так что период работы левой горелки в $1\frac{1}{2}$ —2 раза больше правой и объясняется большой газопроницаемостью рубашки правой камеры, доказательством чего является следующее.

Анализ дыма внизу правого регенератора показывает содержание CO_2 — 5,6%, O_2 — 13,3%, в то время как у левого регенератора дым имеет состав: CO_2 — 11,5% и O_2 — 6,4.

Температура дыма правого регенератора на 30—40° ниже температуры дыма левого при абсолютном значении последней в 150—190° C. Разрежение в дымовом борове — 8,5 мм водяного столба при выходе дыма из правого регенератора и 11 мм — при выходе из левого регенератора. Подсос воздуха в левом регенераторе невелик, что подтверждается разницей в содержании O_2 в дыму по пути его из горелки (точка 2) через регенератор; составляющей всего 1,5—2,5% (4—5% в точке 2 и 6—6,5% внизу регенератора).

В течение 2-го этапа периоды перекидки клапана были сделаны равными, что конечно не могло исправить существующего дефекта в регенераторах, но подчеркнуло асимметричность в работе их и позволило вести изучение горелок более правильно.

Для наблюдения были выбраны точки 1 и 2 сверху и внизу шахты горелки с целью выяснить все изменения, совершающиеся с газами по пути следования их через горелки. Данные испытаний, представляющие систематизированные средние значения из нескольких серий наблюдений, изображены на рис. 4 и 5. При этом в указанной работе сделана попытка выяснить наиболее рациональный метод измерения температур горелки путем одновременной записи температур по термоларе и оптическому пирометру, который визируется на внутреннюю поверхность стен

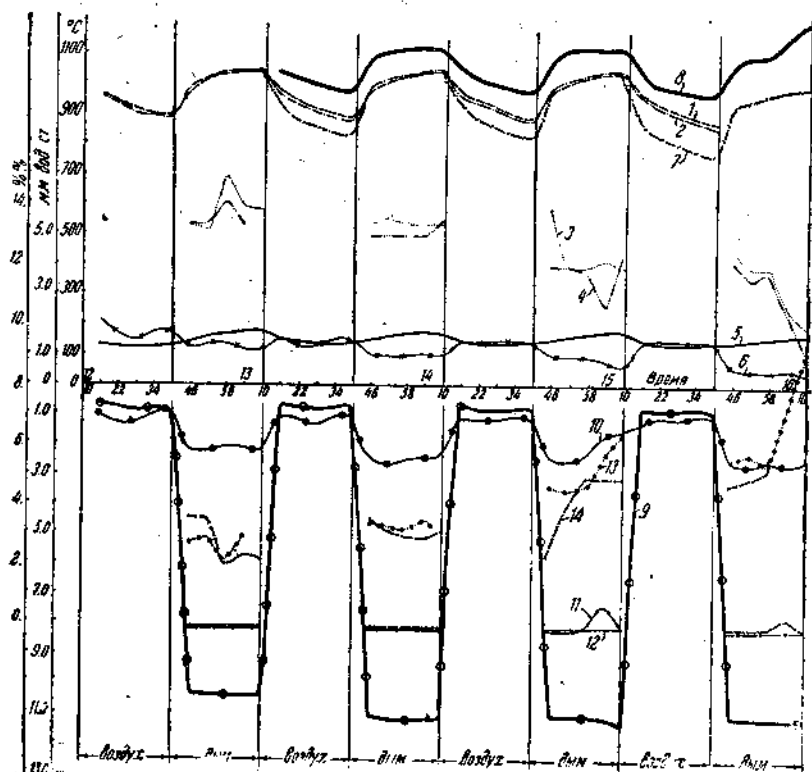


Рис. 4. Характеристика работы левой горелки ванной печи.

и из тонкий шамотовый диск, подвешенный в газовом пространстве; при отбегании с обеих сторон его температура должна близко подходить к температуре газа, с учетом и малой инерцией его¹.

1. Согласно полученным результатам в обеих горелках имеет место следующее изменение температур газов:

а) Левая горелка в точке 1 дает колебание температур в 160° ($1120-960$) — согласно показанию термопары, а в точке 2 — 230° ($1050-820$); оптический пирометр в точке 2 дает разницу в 170° ($1050-880$).

При этом следует отметить, что разница показаний температур, полученных визированием на стенку и на диск, почти совпадает ($\pm 10^{\circ}\text{C}$). Несовпадение разниц термоэлектрического и оптического пирометража по точкам 1 и 2 объясняется тем, что термопара в точке 2 не подвергается лучеиспусканию факела и стен печи через вылет. Отсюда неизбежен вывод, что постановка прибора в точке 1 нерациональна.

б) Правая горелка в точке 1 дает разницу 180° ($1160-980$),

¹ Этот способ предложен М. Г. Степаненко.

а в точке 2 — по термопаре: 270° ($1080-810$ и 220° — по оптическому прибору (Pyropto). Таким образом видно, что по абсолютным значениям температуры правой горелки выше соответствующих температур левой, что и объясняется лучшей работой левой насадки. Это обстоятельство иллюстрируется еще и разностью падений температуры воздуха: в левой горелке воздух за полчаса охлаждается на 130° , а в правой — на 270° .

зв) Сравнивая температурные и изменения газов, воздуха и дыма по обеим горелкам, следует прийти к выводу, что в правой горелке дым теряет по пути от точки 1 до точки 2 — 100° , а воздух приобретает 140° ; в левой — соответственно 130 и 120° , т. е. к. п. д. левой горелки выше, чем правой. Однако построение на этих значениях теплового баланса горелок и исчисление величины к. п. д. невозможно без точного учета

влияния лучеиспускания на прибор, что требует специального исследования. Во всяком случае ориентировочные подсчеты показывают, что к. п. д. у данных горелок весьма достаточен, обуславливая всего лишь $10-12\%$ потери тепла во вне.

Данные температурных измерений приведены на табл. 1.

В табл. 2 дана гидравлическая характеристика горелок.

С точки зрения методики измерения температур можно констатировать, что значения последних (в точке 2) гораздо ближе подходит к истинной температуре газа при дымовом периоде, чем при воздушном; поэтому, как показали контрольные измерения, при измерении термопарой температуры воздуха из полученных значений следует вычесть $40-50^{\circ}$. При хорошей изоляции стен горелок, обуславливающих температуру наружной поверхности, не выше 100° , температуру внутренней поверхности стен горелок, которая ниже температуры газов примерно на $15-20^{\circ}$, лучше измерять оптическим методом.

2. Изменение состава дымовых газов в обеих горелках, приведенное на рис. 4 и 5, показывает, что состав дыма по ходу его меняется, но незначительно, в среднем в пределах $0,5\%$ CO_2 и $1,0\%$ O_2 , причем правая горелка дает более резкую разницу (до 1% CO_2). По времени характерно повышение процента O_2

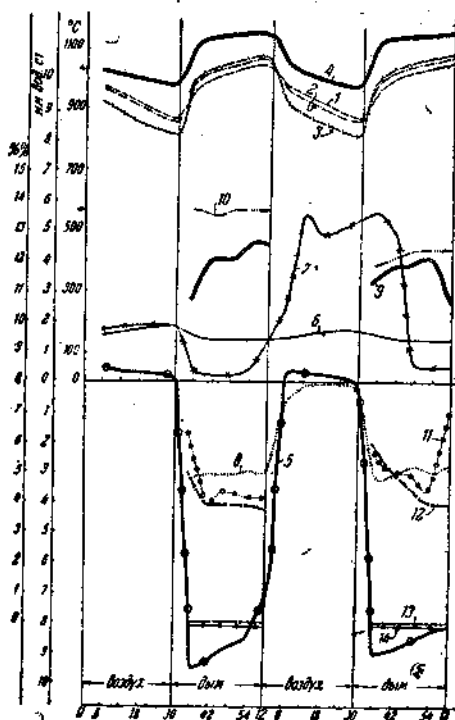


Рис. 5. Характеристика работы правой горелки ванной печи.

Значения температур по горелкам

Время от пере- кидки (в мин.)	№ замеров	Левая горелка						Правая горелка					
		Воздух			Дым			Воздух			Дым		
		Точка № 1. Термопара	Точка № 2. Термопара	Точка № 2. Пи-ропто- диск	Точка № 1. Термопара	Точка № 2. Термопара	Точка № 2. Пи-ропто- диск	Точка № 1. Термопара	Точка № 2. Термопара	Точка № 2. Пи-ропто- диск	Точка № 1. Термопара	Точка № 2. Термопара	Точка № 2. Пи-ропто- диск
				стенка			стенка			стенка			стенка
6	1	945	925	985 990	—	1010	1000 990	1020	895	955 965	1135	1020	1000 970
	2	1045	930	985 980	—	1010	1000 985	1045	915	960 970	1135	1015	1000 970
	3	1035	930	985 980	—	1010	1000 985	1040	910	965 975	1125	1000	1000 960
	4	1005	910	980 970	—	995	—	1060	930	980 1000	1140	1025	1000 970
12	1	925	875	940 950	—	1035	1030 1020	1010	860	930 940	1145	1040	1025 1005
	2	1020	890	940 950	1105	1030	1025 1015	1020	875	930 945	1145	1045	1035 1015
	3	1005	890	940 950	1125	1030	1020 1010	1020	880	930 940	1130	1045	1030 1010
	4	995	880	925 935	1095	1010	—	1045	890	940 960	1175	1060	1050 1025
18	1	905	870	910 925	—	1050	1045 1040	995	845	900 910	1155	1060	1045 1025
	2	995	879	910 920	1120	1050	1040 1030	1005	855	905 920	1145	1065	1050 1030
	3	990	870	920 930	1130	1050	1040 1030	945	845	900 910	1135	1050	1085 1040
	4	985	855	905 915	1105	1030	—	1025	860	920 930	1185	1080	1070 1055
24	1	—	850	900 910	—	1055	1050 1045	980	830	870 880	1155	1070	1060 1040
	2	980	850	895 905	1120	1055	1050 1045	990	825	885 895	1150	1075	1060 1040
	3	980	845	890 905	1130	1055	1050 1040	—	830	880 890	1155	1070	1075 1050
	4	970	830	885 895	1110	1045	—	1005	850	900 920	1180	1090	1080 1060

Время от пере- кидки (в мин.)	№ замеров	Левая горелка						Правая горелка					
		Воздух			Дым			Воздух			Дым		
		Точка № 1. Термомпара	Точка № 2. Термомпара	Точка № 2. Пи- ропто диск стенка	Точка № 1. Термомпара	Точка № 2. Термомпара	Точка № 2. Пи- ропто диск стенка	Точка № 1. Термомпара	Точка № 2. Термомпара	Точка № 2. Пи- ропто диск стенка	Точка № 1. Термомпара	Точка № 2. Термомпара	Точка № 2. Пи- ропто диск стенка
30	1	—	850	$\frac{890}{900}$	—	1065	$\frac{1055}{1050}$	970	810	$\frac{850}{860}$	1160	1075	$\frac{1070}{1050}$
	2	965	830	$\frac{870}{880}$	1125	1060	$\frac{1055}{1050}$	975	810	$\frac{865}{875}$	1165	1085	$\frac{1080}{1060}$
	3	965	830	$\frac{880}{890}$	1130	1050	$\frac{1050}{1045}$	985	805	$\frac{860}{870}$	1175	1090	$\frac{1090}{1075}$
	4	965	825	$\frac{870}{880}$	1110	1045	—	995	830	$\frac{880}{890}$	—	—	—

Таблица 2

Гидравлическая характеристика горелок

Время от перекидки (в мин.)	№ замеров	Левая горелка				Правая горелка			
		Воздух		Дым		Воздух		Дым	
		Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2
6	1	+ 2,2	— 1,0	+ 1,2	— 2,2	+ 1,7	0,0	+ 0,2	— 3,2
	2	+ 1,6	— 1,0	+ 1,0	— 2,4	+ 2,3	— 0,6	+ 5,6	— 3,3
	3	+ 1,5	— 1,0	+ 1,0	— 2,1	+ 1,8	+ 0,1	+ 2,4	+ 0,8
	4	+ 1,5	— 1,2	+ 0,6	— 2,6	+ 2,0	— 0,4	+ 6,0	— 3,0
12	1	+ 1,7	— 1,3	+ 1,4	— 2,2	+ 1,8	0,0	+ 0,2	— 3,1
	2	+ 1,4	— 1,1	+ 1,0	— 2,6	+ 5,6	— 0,2	+ 4,8	— 3,2
	3	+ 1,5	— 1,1	+ 1,0	— 2,5	+ 1,8	+ 0,8	+ 5,6	+ 1,0
	4	+ 1,5	— 1,0	+ 0,6	— 2,6	+ 5,0	0,0	+ 6,0	— 3,0
18	1	+ 1,5	— 1,2	+ 1,4	— 2,0	+ 1,8	+ 0,1	+ 0,2	— 3,1
	2	+ 1,3	— 1,3	+ 1,0	— 2,4	+ 4,8	— 0,1	+ 0,5	— 2,8
	3	+ 1,5	— 1,1	+ 1,0	— 2,2	+ 1,8	+ 0,8	+ 5,0	+ 3,8
	4	+ 1,5	— 1,1	+ 0,5	— 2,4	+ 5,0	0,0	+ 4,0	— 3,0
24	1	+ 1,8	— 0,9	+ 1,2	— 2,0	+ 1,8	0,0	+ 0,3	— 3,0
	2	+ 1,5	— 1,0	+ 1,1	— 2,4	+ 5,0	— 0,1	+ 0,5	— 3,0
	3	+ 1,5	— 1,0	+ 0,8	— 1,6	+ 1,8	+ 0,4	+ 7,0	+ 0,2
	4	+ 1,5	— 1,0	+ 0,6	— 2,6	+ 5,4	+ 0,4	+ 5,4	— 3,0
30	1	+ 1,8	— 0,8	+ 1,2	— 2,2	+ 1,8	+ 0,1	+ 0,5	— 3,1
	2	+ 1,6	— 1,0	+ 1,0	— 2,3	+ 7,8	— 0,2	+ 0,5	— 2,8
	3	+ 1,5	— 1,0	+ 0,6	— 1,5	+ 2,0	+ 1,8	+ 7,0	+ 0,1
	4	+ 1,5	— 1,0	+ 0,5	— 2,4	+ 5,6	0,0	—	—

к концу дымового периода в точке 2, что указывает на влияние возрастающего присоса.

Таблица 3

Анализ газов в горелках

Время от перекидки (в мин.)	№ замеров	Левая горелка						Правая горелка					
		Точка № 1			Точка № 2			Точка № 1			Точка № 2		
		CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
6	1	13,4	3,6	0,0	13,4	2,8	0,0	13,6	5,0	0,0	10,7	6,3	0,0
	2	13,4	3,6	0,0	13,0	3,3	0,0	11,8	6,0	0,0	11,3	5,8	0,0
	3	13,8	2,6	0,0	12,0	4,7	0,0	12,2	6,4	0,0	—	—	—
	4	12,6	4,8	0,0	12,2	5,6	0,0	11,0	6,8	0,0	11,0	6,3	0,0
12	1	13,2	3,6	0,0	13,4	3,0	0,0	13,4	4,0	0,0	12,0	4,0	0,0
	2	13,6	3,2	0,0	13,0	3,4	0,0	12,0	5,0	0,0	11,3	5,0	0,0
	3	12,0	4,2	0,0	12,0	4,6	0,0	11,8	6,2	0,0	—	—	—
	4	12,0	5,0	0,0	11,6	5,8	0,0	12,4	4,6	0,0	11,4	5,6	0,0
18	1	15,0	2,0	0,0	14,2	2,2	0,0	13,6	4,0	0,0	12,0	4,4	0,0
	2	13,4	3,0	0,0	13,0	3,2	0,0	12,4	4,6	0,0	11,8	5,0	0,0
	3	12,0	5,0	0,0	11,8	4,7	0,0	12,0	5,6	0,0	—	—	—
	4	12,0	5,2	0,0	11,9	5,4	0,0	12,0	5,6	0,0	10,6	7,0	0,0
24	1	14,0	2,4	0,0	13,4	3,0	0,0	13,6	4,0	0,0	12,6	4,2	0,0
	2	13,4	3,0	0,0	13,0	3,6	0,0	12,4	4,0	0,0	12,2	4,3	0,0
	3	12,0	2,5	0,0	10,6	5,8	0,8	12,4	5,0	0,0	—	—	—
	4	10,6	7,4	0,4	10,5	7,3	0,0	—	—	—	—	—	—
30	1	13,9	2,3	0,0	—	—	—	13,6	3,8	0,0	12,5	4,2	0,0
	2	13,4	3,2	0,0	13,5	3,0	0,0	12,4	4,0	0,0	10,6	7,0	0,0
	3	12,0	5,0	0,0	12,4	6,4	0,0	12,0	5,2	0,0	11,3	6,2	0,0
	4	10,0	8,0	0,0	9,0	0,1	0,0	—	—	—	—	—	—

Абсолютные значения данных по газовому анализу приведены в табл. 3.

3. Характеристика давления (или разрежения) газов в горелках, представленная на рис. 4 и 5, дает основание считать, что чувствительных подсосов в шахтах горелок не происходит, что и подтверждается газовым анализом. Интересно отметить, что давление газов наверху шахты, у вылета левой горелки (точка 1), мало меняется по времени, составляя в среднем $+1,5$ мм H₂O (см. табл. 4); у правой же горелки разница в давлениях весьма значительна, достигая ~ 4 мм H₂O.

Эту разницу в поведении газов следует отнести за счет неодинаковой работы насадок.

Внизу левой горелки по дыму и по воздуху (точка 2) наблюдается разрежение, причем разница показаний при дымовом и воздушном периодах в точках 1 и 2 не одинакова: воздух по пути снизу вверх «приобретает» 2,5 мм, а разрежение дыма увеличивается на 3,5 мм H₂O. В правой же горелке эта разница еще ощутительнее, составляя по воздуху 3—3,5 мм, а по дыму — 4—4,5 мм H₂O.

Таблица 4

Гидравлическая характеристика горелок

Время от перекидки (в мин.)	№ замеров	Левая горелка				Правая горелка			
		Воздух		Дым		Воздух		Дым	
		Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2
6	1	+2,2	-1,0	+1,2	-2,2	+1,7	0,0	+0,2	-3,2
	2	+1,6	-1,0	+1,0	-2,4	+2,3	-0,6	+5,6	-3,3
	3	+1,5	-1,0	+1,0	-2,4	+1,8	+1,1	+2,4	+0,8
	4	+1,5	-1,2	+0,6	-2,6	+2,0	-0,4	+6,0	-3,0
12	1	+1,7	-1,3	+1,4	-2,2	+1,6	0,0	+0,2	-3,1
	2	+1,4	-1,1	+1,0	-2,6	+5,6	-0,2	+4,8	-3,2
	3	+1,5	-1,1	+1,0	-2,5	+1,8	+0,8	+5,6	+1,0
	4	+1,5	-1,0	+0,6	-2,6	+5,0	0,0	+6,0	-3,0
18	1	+1,5	-1,2	+1,4	-2,0	+1,8	+0,1	+0,2	-3,1
	2	+1,3	-1,3	+1,0	-2,4	+4,8	-0,1	+0,5	-2,8
	3	+1,5	-1,1	+1,0	-2,2	+1,8	+0,8	+5,0	+3,8
	4	+1,5	-1,1	+0,5	-2,4	+5,0	0,0	+4,0	-3,0
24	1	+1,8	-0,9	+1,2	-2,0	+1,8	0,0	+0,3	-3,0
	2	+1,5	-1,0	+1,1	-2,4	+5,0	-0,1	+0,5	-3,0
	3	+1,5	-1,0	+0,8	-1,6	+1,8	+0,4	+7,0	+0,2
	4	+1,5	-1,0	+0,6	-2,6	+5,4	+0,4	+5,4	-3,0
30	1	+1,8	-0,8	+1,2	-2,2	+1,8	+0,1	+0,5	-3,1
	2	+1,6	-1,0	+1,0	-2,3	+7,8	-0,2	+0,5	-2,8
	3	+1,5	-1,0	+0,6	-1,5	+2,0	+1,8	+7,0	+0,1
	4	+1,5	-1,0	+0,5	-2,4	+5,6	0,0	—	—

Подсчет сопротивлений при проходе воздуха показывает, что для динамики газов (воздуха) имеет значение инжектирующее влияние форсунок. Сопротивление же самой горелки следует оценить в 0,3—0,5 мм H_2O .

4. Сравнивая данные исследования по обеим горелкам, следует прийти к выводу, что тепловая работа их является в сущности идентичной. С точки зрения реверсии тепла, важной в теплотехническом отношении, сами по себе горелки в пределах точности наблюдения одинаковы. Тот факт, что работа насадок не оказалась симметричной (вследствие различной засоренности и газопроницаемости стен), вызвал целый ряд следствий и в показателях работы горелок (различия в температурах и давлениях). Исследуя эти различия, нетрудно установить, что и количественно они должны быть всецело отнесены за счет различной работы насадок. Совпадающий газовый анализ и малое отличие в температурных перепадах внутри горелок позволяет считать работу последних одинаковой и достаточно удовлетворительной, поскольку ориентировочный подсчет теплового к. п. д. дает небольшую величину наружных потерь. Это обстоятельство в полной мере оправдывает как самую конструкцию горелок, так и метод кладки и изоляции стен ее.

При этом необходимо обратить внимание на то, что гидравлика газов, вернее изменение ее, будет количественно различным в случае отопления нефтяной форсункой или отопления генераторными газами.

Б. Характеристика газового пространства

Как уже указано, газовое пространство ванной печи изучалось с трех точек зрения: распределение температур, изучение состава газа и динамической характеристики. Полученные данные расположены в виде таблиц и отдельных диаграмм, иллюстрирующих изменение показаний определенного пирометра (во времени или пространстве).

1. Изменения температур во время и в пространстве

Изменение температур во времени и пространстве получено на основе систематических измерений температур по узлам пространственной сетки, ясной из схемы расположения термомпар (рис. 1, 2 и 3). Поскольку метод измерения позволяет наблюдать процесс измерения температур по двум измерениям — времени и пространству, целесообразно анализ результатов произвести раздельно.

а) Изменение температуры в толще газовой среды (по вертикалям) при условии «моментальной фотографии температур» представляется следующим: в подсводовой зоне (горизонт — 0,2 м) через 6 мин. после переключения максимум температур устанавливается в двух пунктах — между 3-м и 4-м сечениями и в левом углу, в плоскости 2-го сечения. Этот эффект наблюдается при обоих направлениях пламени и объясняется локализацией в одном месте печи фокуса горения, расположенного примерно по оси ее.

Таблица 5

Распределение температур по горизонту 0,2 (200 мм от свода)

№ верти- кали	Пламя справа					Пламя слева				
	Время от перекидки (в мин.)									
	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30
1	1 280	1 280	1 275	1 260	—	1 295	1 280	1 270	1 275	1 280
2	1 280	1 300	1 300	1 300	1 300	1 285	1 285	1 285	1 290	1 290
3	1 305	1 320	1 340	1 340	1 340	1 305	1 280	1 250	1 255	1 250
4	1 370	1 355	1 355	1 355	1 330	1 485	1 485	1 485	1 485	1 400
5	1 360	1 370	1 370	1 350	1 350	1 340	1 340	1 340	1 340	1 345
6	1 290	1 290	1 295	1 295	1 330	1 255	1 245	1 245	1 255	1 260
7	1 215	1 210	1 205	1 205	1 205	1 255	1 260	1 260	1 260	1 265
8	1 350	1 340	1 350	1 350	1 350	1 360	1 370	1 370	1 340	1 350
9	1 325	1 330	1 330	1 330	1 325	1 320	1 320	1 320	1 320	1 315
10	1 275	1 275	1 275	1 275	1 275	1 295	1 300	1 300	1 295	1 295
11	1 295	1 295	1 295	1 295	1 295	1 335	1 335	1 325	1 315	1 305

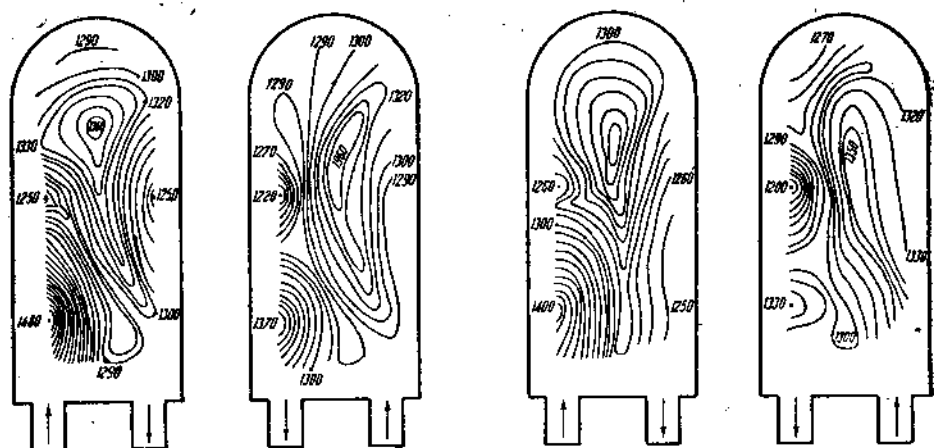


Рис. 6. Изотермы горизонта 0,2.

Таблица 6

Распределение температур по горизонту 0,8 (800 мм от свода)

№ верти- кади	Пламя справа					Пламя слева				
	Время от перекидки (в мин.)									
	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30
1	1 285	1 270	1 265	1 270	1 270	1 320	1 285	1 260	1 270	—
2	1 400	1 400	1 350	1 340	1 330	1 340	1 315	—	—	—
3	1 335	1 335	1 330	1 330	1 330	1 275	1 275	1 270	1 265	1 260
4	1 275	1 275	1 275	1 275	1 270	1 395	1 395	1 400	1 400	1 400
5	1 285	2 275	1 275	1 275	1 275	1 275	1 265	1 265	1 270	1 270
6	1 230	1 220	1 205	1 215	1 215	1 190	1 190	1 190	1 190	1 180
7	1 290	1 280	1 285	1 285	1 285	1 330	1 350	1 355	1 350	1 355
8	1 320	1 210	1 315	1 310	1 305	1 315	1 305	1 295	1 300	1 310
9	1 265	1 270	1 275	1 280	1 280	1 265	1 265	1 270	1 275	1 280
10	1 280	1 280	1 280	1 280	1 280	1 300	1 295	1 295	1 295	1 295
11	1 765	1 265	1 295	1 265	1 265	1 295	1 300	1 300	1 290	1 290

Наличие второго максимума слева у горелки объясняется какой-то скрытой тепловой инерцией этой части кладки, ибо анализ карт изотерм не позволяет перенести в эту точку фокус пламени левой горелки. Качественно это расположение сохраняется за все время полупериода, причем абсолютные температуры снижаются на 70—80° именно в этой последней точке, сохраняясь неизменными в середине дуги пламени (плоскость III—IV).

В наиболее глубокой зоне (горизонт 0,8 м) абсолютные значения температур снижаются на 70—100°, но относительно сохраняют свое положение, причем по времени в течение полупериодов рас-

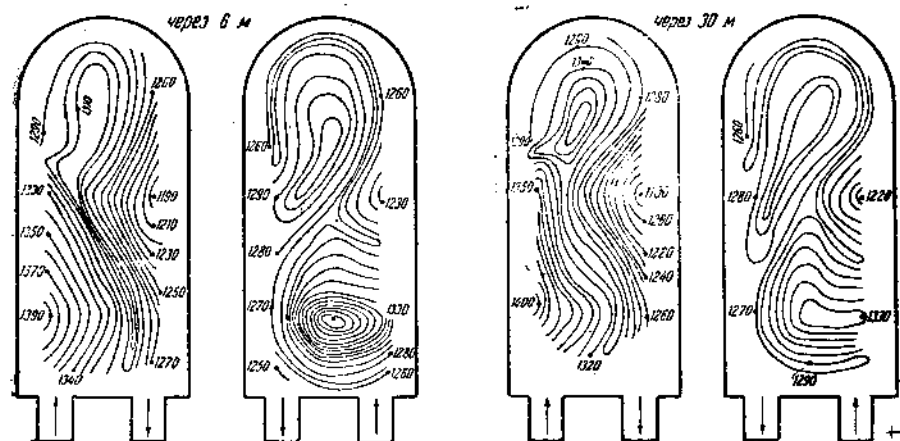


Рис. 7. Изотермы горизонта 0,8.

Таблица 7
Распределение температур по горизонту 0,4 (400 мм от свода)

№ верти- кали	Пламя справа					Пламя слева				
	Время от перекидки (в мин.)									
	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30
1	1325	1325	1300	1330	1330	—	—	1300	1300	1300
2	1340	1320	1320	1320	1320	1340	1345	1345	1345	1345
3	1385	1420	1400	1395	1375	1280	1280	1280	1280	1280
4	1335	1335	1335	1335	1335	1455	1455	1450	1475	1475
5	1350	1340	1340	1350	1370	1330	1330	1330	1330	1330
6	1285	1285	1285	1285	1290	1270	1270	1270	1270	1270
7	1260	1245	1245	1245	1235	1275	1320	1315	1305	1305
8	1335	1335	1335	1335	1335	1325	1335	1335	1335	1335
9	1335	1335	1340	1345	1350	1325	1320	1320	1325	1320
10	1280	1280	1285	1285	1285	1295	1300	1300	1300	1300
11	1275	1275	1265	1265	1265	1305	1305	1285	1285	1285

Таблица 8
Распределение температур по горизонту 0,6 (600 мм от свода)

№ верти- кали	Пламя справа					Пламя слева				
	Время от перекидки (в мин.)									
	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30
1	1320	1320	1320	1325	1320	1290	1300	1300	1300	1305
2	1330	1325	1335	1335	1340	1320	1325	1330	1335	1335
3	1315	1375	1360	1355	1355	1275	1265	1260	1260	1265
4	1335	1335	1315	1325	1335	1475	1445	1445	1440	1445
5	1365	1345	1325	1345	1345	1325	1325	1325	1325	1325
6	1270	1250	1255	1255	1255	1230	1220	1210	1215	1215
7	1195	1185	1180	1180	1180	1235	1230	1230	1235	1235
8	1325	1325	1325	1335	1335	1335	1335	1335	1335	1335
9	1325	1325	1320	1320	1320	1320	1320	1320	1310	1315
10	1275	1275	1275	1275	1275	1295	1295	1295	1295	1295
11	1270	1260	1250	1250	1240	1260	1250	1240	1240	1240

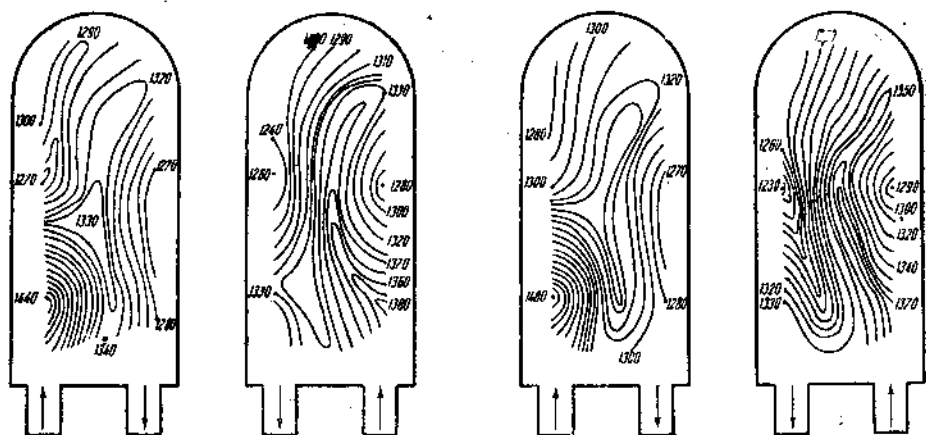


Рис. 8. Изотермы горизонта 0,4.

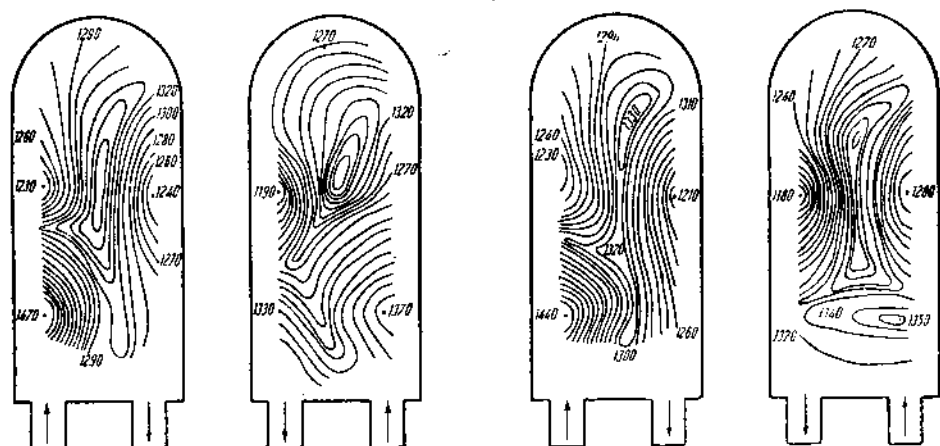
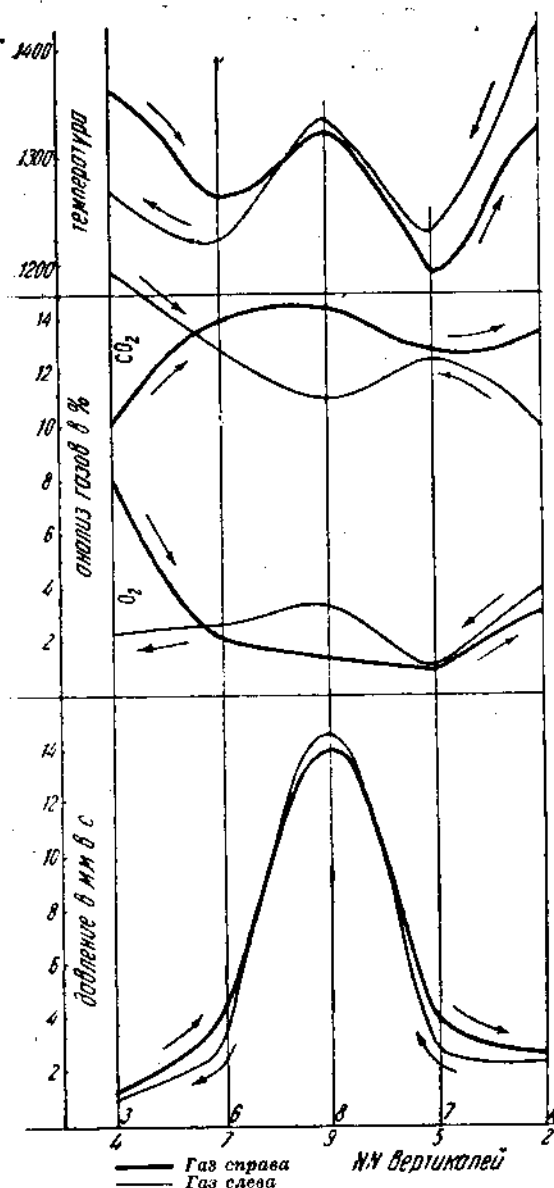


Рис. 9. Изотермы горизонта 0,6.

пределение температур почти качественно не меняется, на что указывают карты изотерм (рис. 6).

Распределения по горизонту 0,4 и 0,6 являются промежуточными, связывая собой верхнюю и нижнюю зоны. При этом обращает на себя внимание сравнительная устойчивость температур выработочной части (IV—V сеч.), где температуры являются стабильными.

б) Изменение температуры в пространстве интересно с точки зрения распределения температур по длине факела и обусловленной этим температуры выработочной зоны, где последняя должна иметь стабильный характер, вне зависимости от времени (в течение полупериода) и работы отдельных горелок.



10. Характеристика факела по длине (путь 4-7-9-5-2).

Данная печь работала без экрана, отделяющего варочную часть от выработочной. Согласно наблюдениям траектория факела лежала между IV и V сечениями, так что его путь проходил либо через вертикали: 4-7-9-5-2 (и обратно), либо через 4-7-10-11-8-5-2 (и обратно). Исходя из размеров поперечного факела, для характеристики его температур наиболее правильным будет взять данные по высоте 0,6 (60 см под сводом). Развертывая путь факела в прямую и беря значения по времени средние за полупериод, получаем следующие диаграммы (рис. 10 и 11).

Анализ температурных данных показывает, что направление пламени (разные горелки) почти не меняет относительного распределения температур самого факела. При коротком пути максимум (вертикаль 9) совпадает с осью печи (1330—1340°). При этом надо упомянуть, что начальные и конечные точки пути (2 и 4) дают более высокие температуры; однако к их

значениям следует относиться весьма осторожно, учитывая искажающее влияние лучеиспускания стен на оболочку термомпары; при этом нельзя упускать из виду и явления догорания факела в данном этапе пути, что иллюстрируется повышением процента CO_2 и падением процента O_2 . Это сказывается в конце пути факела, идущего из левой горелки и в меньшей степени при работе правой

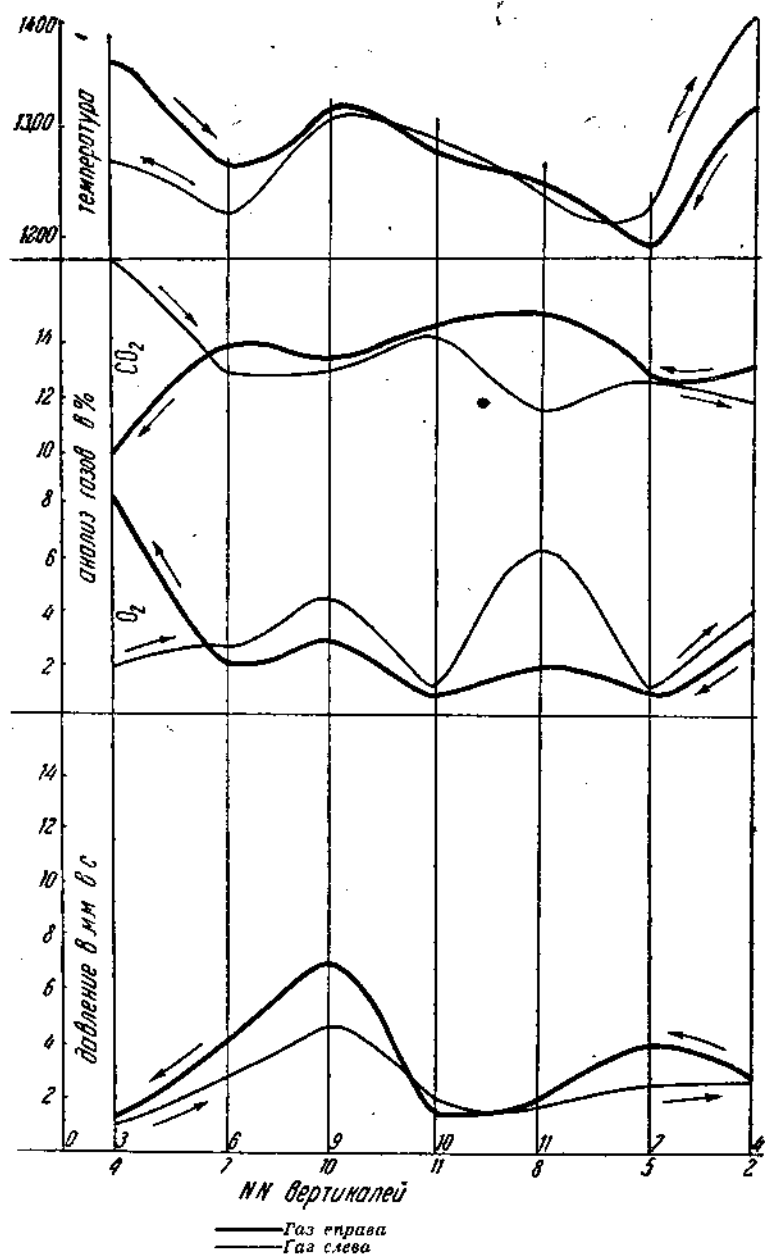


Рис. 11. Характеристика факела по длине (путь 4-7-10-1-8-5-2).

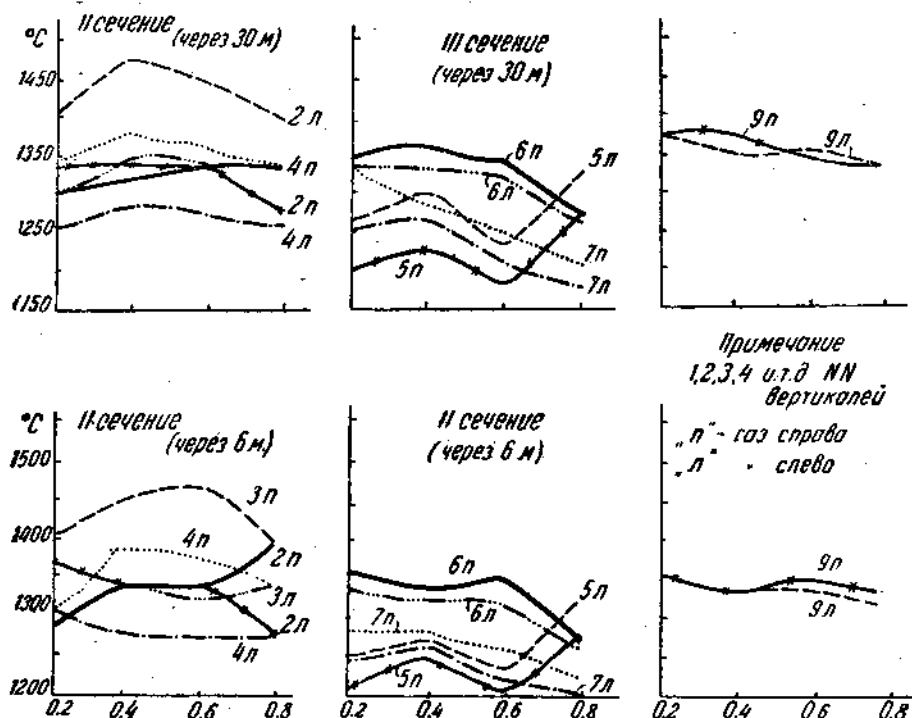


Рис. 12. Изменение температуры газовой среды по вертикалям.

горелки. А так как обе горелки близки друг к другу, то естественно, что обе причины (догорание и излучение стен) сказались на обеих кривых, обозначив симметричные максимумы. При этом температура конца факела и ниже температуры начала его, на факел слева дает более высокие температуры, чем справа. В результате сложной игры взаимоотношений лучистой теплоты факела, стен и температуры самого факела и создается предпосылка к искаженным показателям термопар. Если бы горелки были пространственно изолированы друг от друга, то трех максимумов быть не могло.

При более длительном пути максимум температуры растягивается между 2 вертикалями — 10 и 11, т. е. становится несколько асимметричным относительно оси печи, что доказывает, что в сущности факел «не долетает» до 11-й вертикали и что траекторию его следует поместить по пути 10 между 9 и 11 — 8; тогда получаем симметричную фигуру, устойчивость которой сохраняется при обоих положениях пламени.

в) Распределение температур по отдельным зонам печи ясно видно из диаграмм изотерм. Расположение последних меняется главным образом по времени и направлению факела в области варочной части бассейна до III поперечного сечения. Здесь замечается наиболее резкое падение температур от центра к периферии и обнаруживается зависимость от хода югня,

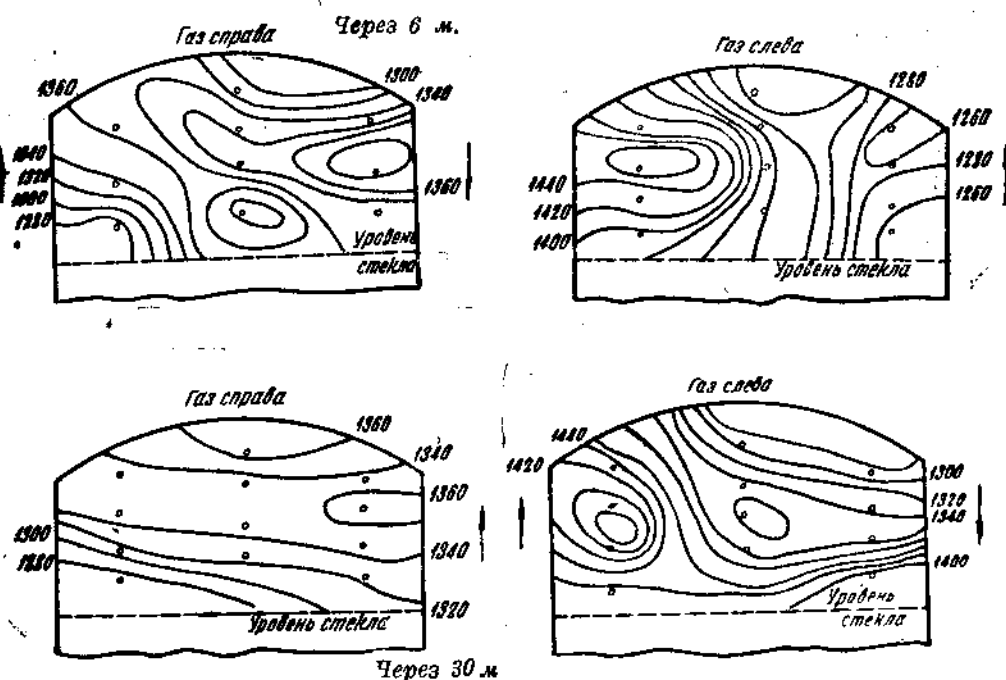


Рис. 13. Изотермы газового пространства (сечение II).

сообщающая диаграммам зеркальную симметрию при двух режимах пламени (огонь справа, огонь слева). В области же выработочной части ванны характер кривых изотерм должен быть более правильным и постоянным, имея вид замкнутых concentрических кривых с центром примерно над выходом стекломассы из перешейка («Quellpunkt»). Наиболее правильными по рисунку являются изотермы нижнего сечения, в наибольшей мере зависящие от температурного режима стекломассы. В меньшей мере это соответствует распределению температур в верхнем горизонте (0,2 м), где тепловая инерция свода является консервативным началом. Средние же горизонты, находящиеся под преимущественным влиянием сменяющегося газового потока, имеют своеобразный порядок расположения изотерм, рисунок которых подвержен случайным и временным изменениям.

г) Вертикальное распределение температур является интересным с точки зрения выяснения влияния тепловой роли свода, газа (факела) и стекла, помогая разобраться в сложной обстановке одновременной, комбинированной теплопередачи в системе: газ — свод — стекломасса, усложненной еще косвенным воздействием лучеиспускания (и поглощения тепла) стен.

Анализ изображенных на рис. 12 диаграмм показывает, как меняется температура газа по вертикали в зависимости от места

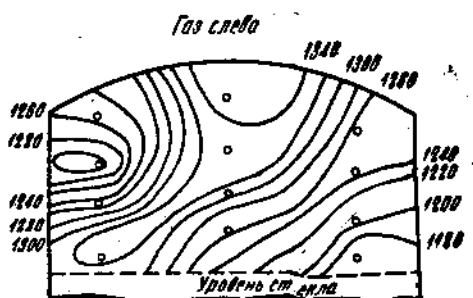
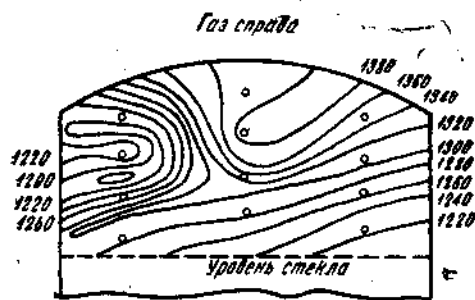
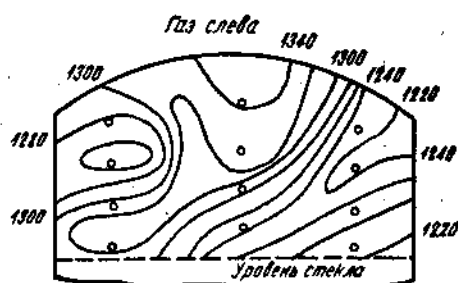
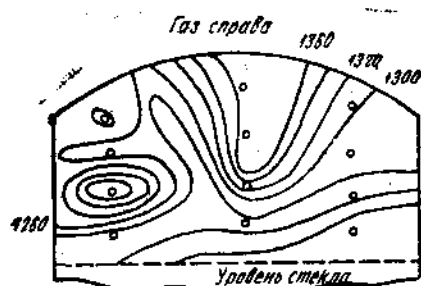
бассейна. В сечении II (вертикали 2, 3, 4) максимум температуры приходится на середину толщины факела — горизонты 0,4—0,6 м, т. е. температуры падают и к своду и к зеркалу стекломассы; в этой зоне факел получает свое развитие, причем на оси печи (вертикаль 3) получается средняя температура, уже не снижающаяся по направлению к зеркалу. Как видно, отдельные горелки работают различно, поскольку угол наклона форсунок, определяющих направление оси факела, зависит от установки их. Максимальные значения получаются у левой горелки при вылете газов, минимальные — у правой, тоже при вылете газов. Время почти не меняет относительного распределения температур, вызывая лишь небольшое снижение их в нижнем горизонте (0,3 м). В сечении III распределение в общем остается тем же; снижаются только абсолютные значения температур и максимум перемещается к своду. Лишь вертикаль 5 дает своеобразное изменение с двумя максимумами — на горизонте 0,4 и 0,8. Поскольку такой характер кривой удерживается при обоих направлениях пламени, эти максимумы следует приписать случайности в режиме, так как эта температура сопровождается максимумом CO_2 давления и минимумом содержания O_2 .

Интересно сопоставить вертикальное распределение температур на границе варочного и выработочного бассейнов. Наличие экрана, верхний край которого достигает горизонта 0,6, должен

Таблица 9

Сечение	Направл. пламени	Время	Направление изменения температур		Лев. стор.	Прав. стор.	
			левая сторона	правая сторона			
II	Газ справа	Через 6 " 30	Возрастает снизу вверх	Возрастает сверху вниз	↑	↓	Возрастает к центру
			Возрастает сверху вниз	Возрастает снизу вверх	↓	↑	
	Газ слева	Через 6 " 30	Возрастает снизу вверх	Возрастает сверху вниз	↑	↓	
			Неопредел.	Неопредел.	—	—	
III	Газ справа	Через 6 " 30	Возрастает сверху вниз	Возрастает снизу вверх	↓	↑	Возрастает к центру
			То же	То же	↓	↑	
	Газ слева	Через 6 " 30	Возрастает сверху вниз	Неопредел.	↓	—	
			То же	Возрастает снизу вверх	↓	↑	

Через 6 м.



Через 30 м.

Рис. 14. Изотермы газового пространства (сечение III)

был бы обуславливать перелом в газовых изотермах при переходе от III сечения к IV. Однако это не замечается по полученным данным, что заставляет предполагать, что это температурное падение задерживается лучеиспусканием горячей стекломассы, выходящей из перешейка.

Анализ изотермических графиков вскрывает целый ряд любопытных обстоятельств. Так на рис. 13 и 14 видно — правые и левые вертикали дают образцы изменения температур, которые можно изобразить следующей таблицей (см. табл. 9).

Таким образом правая сторона печи имеет преимущественно высокую температуру у свода, а слева — ближе к стекломассе. Этот эффект может быть объяснен направлением факела, поскольку и время после перекидки не оказывает решающего влияния на распределение левой стороны. Однако по сечению II следует отметить изменение температур по времени: через 30 мин. относительное положение меняется, что как раз и объясняется несимметрией факелов (обеих горелок), которые лишь по истечении

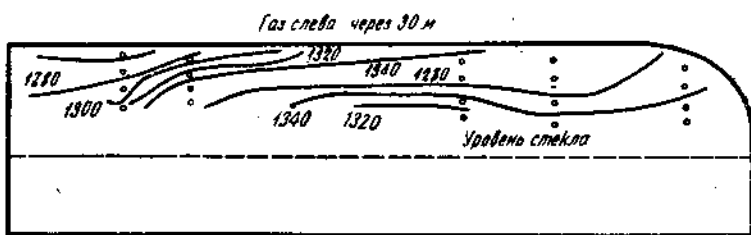
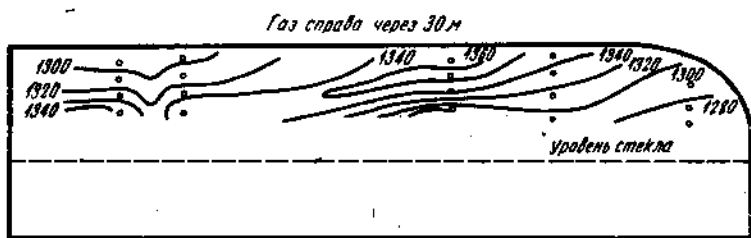
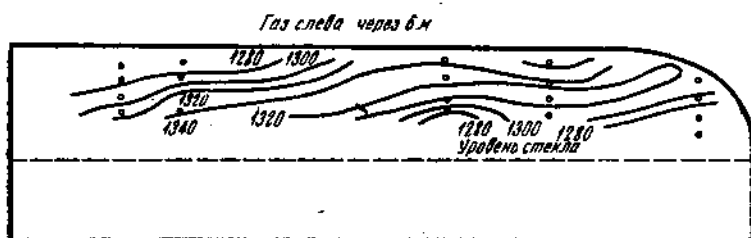
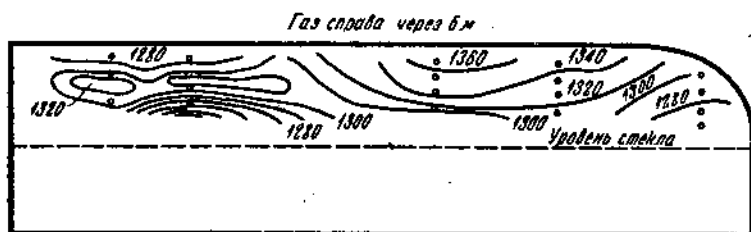


Рис. 15. Изотермы газового пространства (средний и продольный вертикальные разрезы).

времени (развитие пламени) могут осилить тепловую инерцию свода и стекломассы и переместить максимум температуры в газовом слое. Что же касается газовой зоны, расположенной по продольной оси печи, то здесь направление газа почти не меняет карты изотерм (рис. 15), так же как и время, т. е. здесь режим является вполне стабильным.

2. Анализ газового пространства печи

Согласно принятой методике, анализ газа фиксировался через 5 мин. по каждой вертикали, отдельно по различным направлениям пламени. Эта характеристика имеет главным образом вспомогательный характер, поскольку позволяет проверять достоверность температурных изменений.

а) Наиболее интересным представляется изменение состава газа по пути факела. Эта характеристика дана на рис. 10 и 11. При работе правой горелки содержание CO_2 возрастает по пути факела, но достигает максимума у выходной горелки. Иными словами здесь фокус горения оказывается приближенным к вылету, что подтверждается пониженным содержанием O_2 и более высокой температурой по вертикали 4; это обстоятельство увязывается и с более высокой температурой дыма в шахте левой горелки. Падение процента CO_2 и повышение процента O_2 по вертикали 9, повидимому, результат случайного анализа, поскольку давление в этой зоне дает максимальную цифру (13—14 мм H_2O). При работе левой горелки — максимум CO_2 достигается уже у III сечения и далее происходит лишь незначительное разбавление воздухом (повышение процента O_2), что допустимо, учитывая сильное понижение давления по мере приближения к вылету.

б) Изменение состава по толще газовой зоны иллюстрируется рис. 16.

Максимум CO_2 наблюдается в середине толщи — горизонты 0,4—0,6 в сечении II; в сечении III уже встречаются исключения, а в сечении IV закономерность оказывается нарушенной. При этом направление газа обуславливает максимум содержания CO_2 у противоположной горелки, т. е. указывает на то, что развитие факела (полное горение) наступает сравнительно поздно. Увеличение содержания CO_2 по направлению книзу должно быть объяснено большим удельным весом ее и большой теплоемкостью, обуславливающей более легкую потерю тепла, которая влечет за собой остывание и увеличение удельного веса. Фактор времени не всегда оказывается достаточно заметным; по вертикалям 3 и 4 разница доходит до 2—3%, а в остальных случаях до 1—1,3%, что указывает на локализацию места горения далее II сечения, до которого процесс горения не является установившимся.

Содержание O_2 находится в соответствии с изменением CO_2 . С точки зрения химии стекловарения представляется интересным газовый состав на нижнем горизонте, хотя необходимо оговорить, что горизонт 0,8 еще относительно далек от зеркала стекломассы.

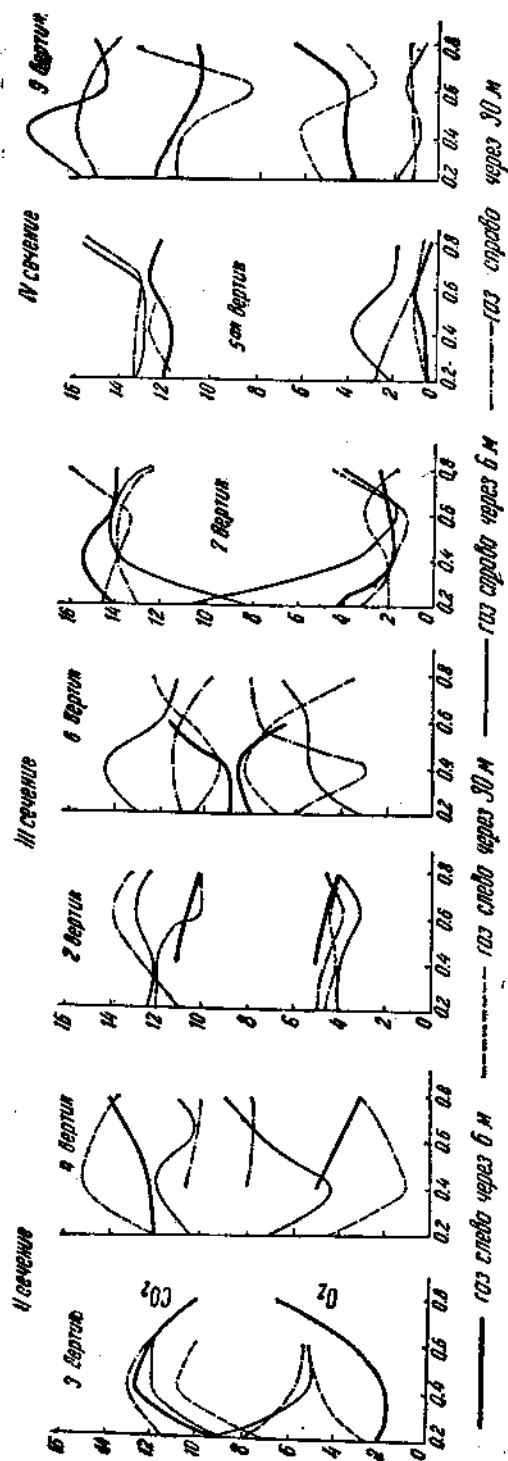


Рис. 16. Изменение состава газа по глубине (сечение II, III, IV).

Однако важно уловить тенденцию в изменении, чтобы можно было сделать общие выводы относительно газов, омывающих стекломассу. Содержание O_2 растет по направлению к стекломассе, давая максимум на горизонте 0,8 только в средней продольной зоне (вертикали 3—6—9), равный 6—8%.

Боковые части ванны (вертикаль 5) обнаруживают минимальное содержание O_2 , причем правая половина дает наименьшее значение, очевидно вследствие более резкого наклона факела к зеркалу.

Постепенное изменение состава по горизонтам иллюстрируется рис. 17, 18, 19 и 20, представляющими карту изохимен газа по CO_2 .

По горизонту 0,2 в начале пуска факела максимум CO_2 — 14,5—15% в выработочной части (вертикаль 11), причем здесь наблюдается зеркальная симметрия изохимен (рис. 17). К концу полупериода содержание CO_2 возрастает по пути факела. Следующие горизонты — 0,4 и 0,6 — не дают такой симметрии, что по видимому объясняется сменяющимся составом движущегося газа (рис. 18 и 19). Время значительно меняет карту изохимен.

Горизонт 0,8 (рис. 20) уже описан ранее. Симметрия в рисунке кривых уже не изменяется, и это следует объяснить различной ориентацией оси факела.

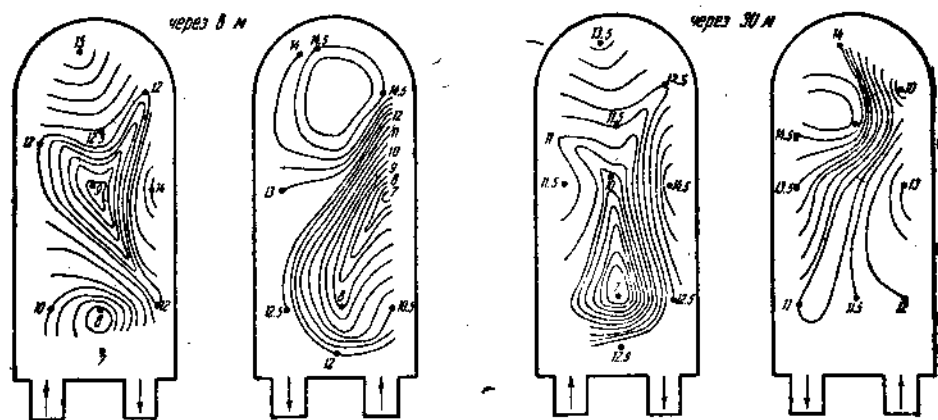


Рис. 17. Изменение содержания CO_2 в газах по горизонтали 0,2.

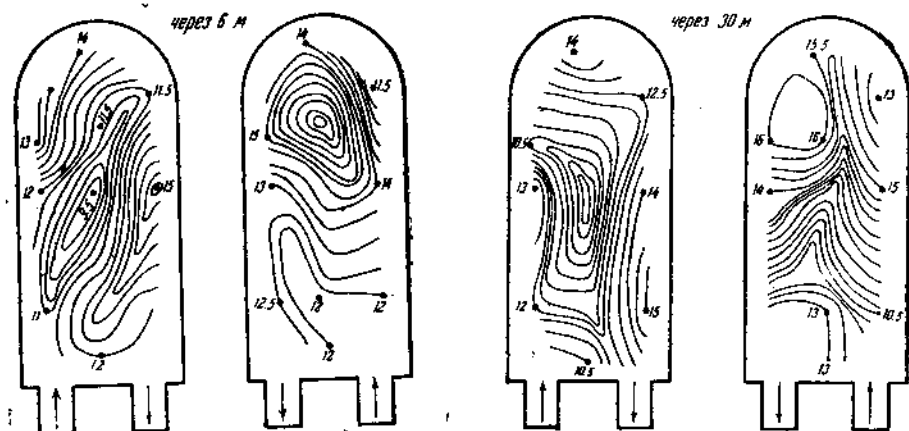


Рис. 18. Изменение содержания CO_2 в газах по горизонтали 0,4.

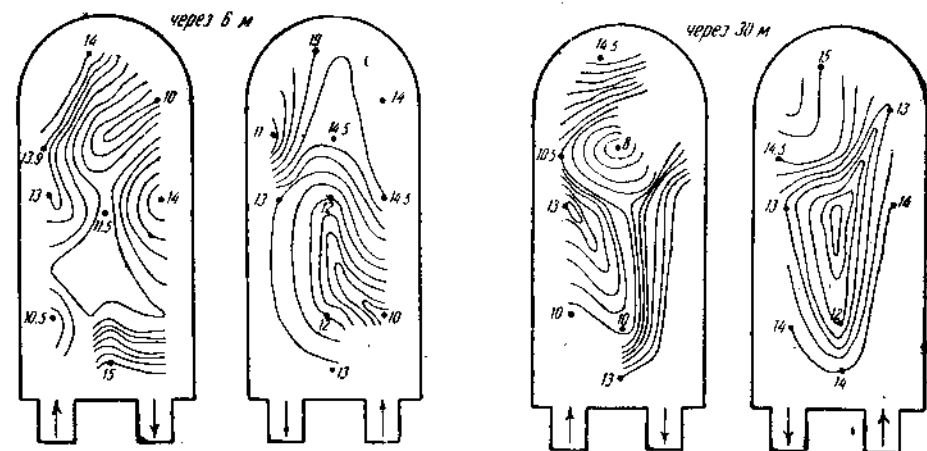


Рис. 19. Изменение содержания CO_2 в газах по горизонтали 0,6.

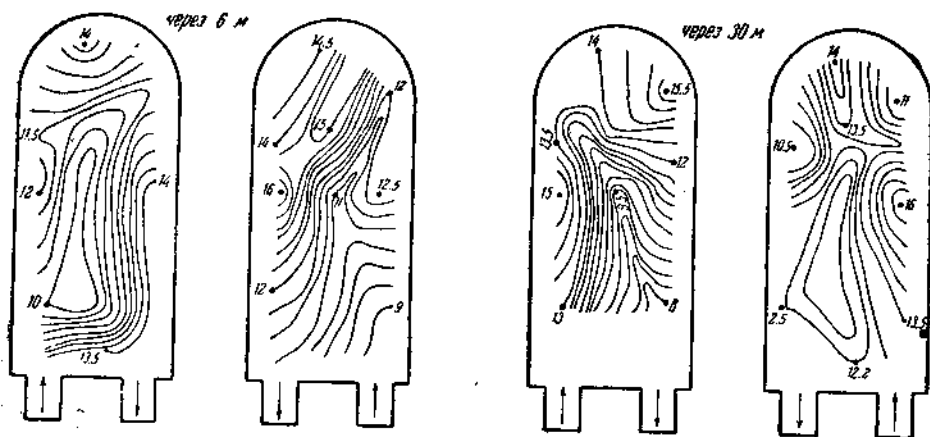


Рис. 20. Изменение содержания CO_2 в газах по горизонтали 0,8.

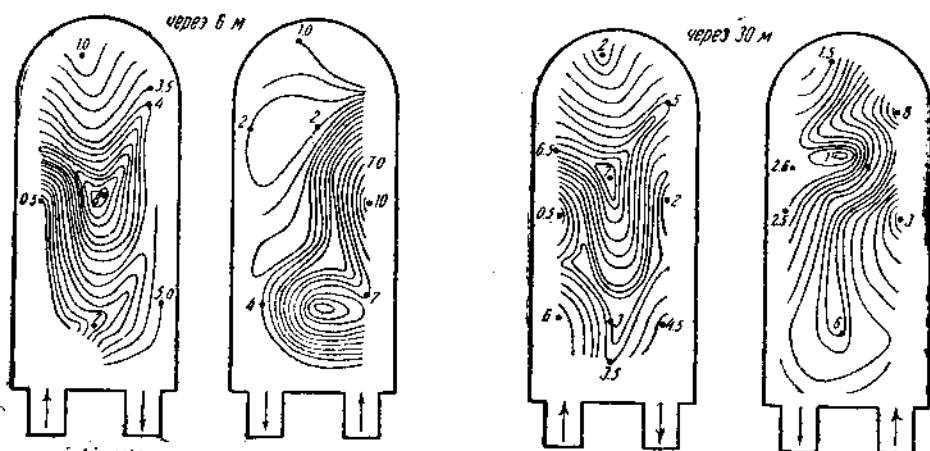


Рис. 21. Изменение содержания O_2 в газах по горизонтали 0,2.

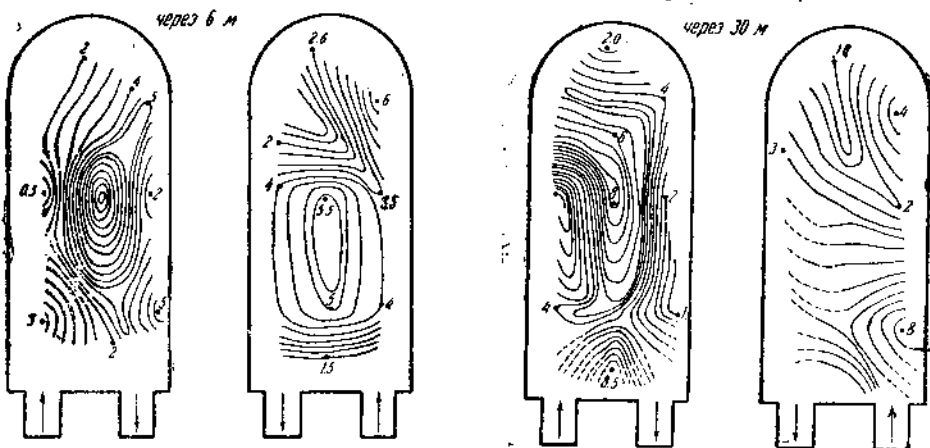


Рис. 22. Изменение содержания O_2 в газах по горизонтали 0,4.

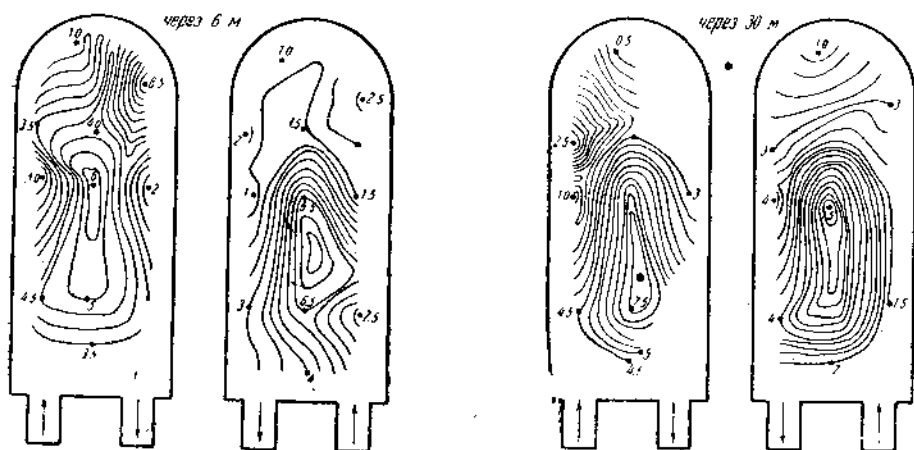


Рис. 23. Изменение содержания O_2 в газах по горизонтали 0,6.

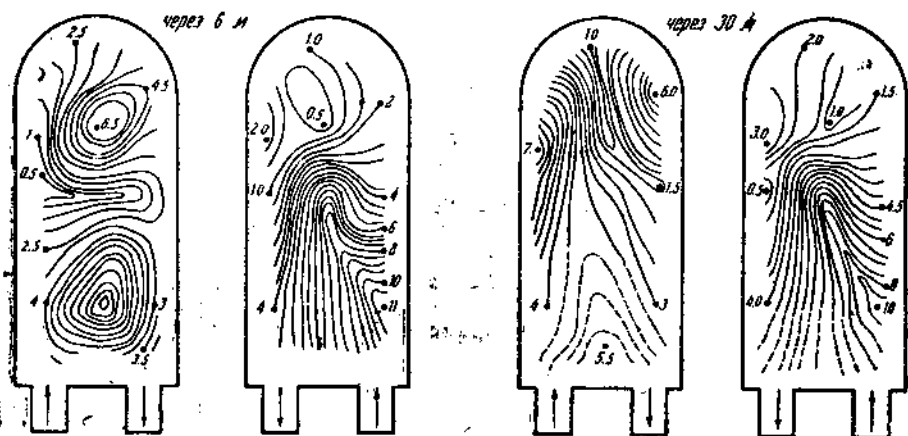


Рис. 24. Изменение содержания O_2 в газах по горизонтали 0,8.

Сравнение изотерм с изохименами показывает, что строгий аналогии в них нет в области выработочной части: в то время как изотермы, в особенности по горизонтам 0,2 и 0,8, представляют собой сравнительно редкие concentрические кривые, изохимены имеют беспорядочные направления и не замкнуты. Учитывая и неизбежные ошибки наблюдения, все же следует упомянуть, что в этой части печи нет устойчивой и определенной локализации отдельных фаз горения, из-за центробежной силы создающей циклон. В табл. 10, 11, 12 и 13 приведены данные по анализу газов.

№ верти- каль	Пламя справа														
	Время от перекидки (в мин.)														
	6			12			18			24			30		
	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
1	12,2	3,8	1,2	14,0	1,8	1,4	7,2	2,0	1,0	14,6	1,8	1,6	—	—	—
2	9,0	9,2	0	9,0	9,0	0	9,7	8,2	0	10,6	6,2	0	11,6	5,8	0,1
3	10,5	7,1	0	13,0	4,0	0,7	12,6	3,6	0	—	—	—	—	—	—
4	12,4	4,0	3,0	12,0	3,0	2,0	13,0	4,0	0	17,0	2,0	1,2	11,0	5,0	0
5	12,4	2,8	0,9	12,7	3,0	1,2	13,0	2,4	0,7	12,0	4,6	0	10,8	6,0	0
6	7,0	10,0	0	9,0	8,0	0,2	11,0	7,0	0	9,8	7,4	0	13,0	3,0	0,1
7	13,2	2,2	0	12,8	2,6	0	13,6	3,4	0	13,8	5,0	0	13,6	2,6	0
8	15,2	1,8	0	14,4	2,0	1,4	15,0	0,8	0	15,0	1,5	0	15,0	1,0	0
9	14,4	1,2	0	14,0	2,8	0	12,0	2,8	0	12,8	2,0	0,6	9,8	8,2	0
10	14,4	1,2	0	14,4	1,0	0	12,8	1,2	2,0	13,2	1,8	0	13,8	1,6	0
11	14,0	2,0	0	13,6	2,6	0	14,6	1,6	0	14,7	1,8	0	14,5	2,7	0

№ верти- каль	Пламя справа														
	Время от перекидки (в мин.)														
	6			12			18			24			30		
	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
1	11,2	1,4	0	1,5	1,2	0	9,2	1,6	0	14,6	1,4	0,2	13,0	4,0	0
2	12,0	5,1	0	12,0	5,0	0	13,8	6,0	0	13,2	5,0	0	13	5,8	0
3	13,0	4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	12,2	4,0	0	12,4	4,3	0	13,0	4,0	0	—	—	—	—	—	—
5	14,4	5,4	0	13,0	5,6	0	12,2	6,4	0	11,3	2,2	3,6	11,5	2,8	2,5
6	13,8	3,4	0	14,4	2,0	0	15,0	2,0	0	15,0	1,8	0	14,8	2,0	0
7	12,8	3,8	0	12,0	3,0	0,4	12,8	4,0	0	14,0	4,0	0	—	—	—
8	16,0	0,8	0	17,6	1,0	0	16,6	1,0	0	16,0	1,5	0	15,8	1,2	0
9	11,6	5,8	0	11,8	4,2	1,4	11,4	6,0	0	12,4	4,2	0	12,7	3,0	0
10	13,0	2,2	0	15,0	1,4	0	14,6	1,6	0	14,4	1,6	0	15,8	0,8	0
11	15,0	1,8	0,2	14,0	3,6	0	14,7	2,7	0	15,0	3,7	0,2	15,0	3,0	0

В качестве дополнительного материала на рис. 21, 22, 23 и 24 приведены изменения содержания в газах O₂.

Не принимая во внимание отдельных максимальных значений, видно, что содержание O₂ повышается по мере удаления от свода, причем время почти не меняет распределения (напр., го-

Таблица 10

по горизонту 0,2

№ верти- кали	Пламя слева														
	Время от перекидки (в мин.)														
	6			12			18			24			30		
	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
1	7,0	5,2	0	12,4	7,8	0	12,2	3,8	1,4	13,0	3,4	0,5	12,4	3,6	1,4
2	8,2	2,1	7,6	6,0	1,2	5,8	7,9	2,0	7,6	7,4	2,4	7,0	7,2	2,8	6,2
3	12,0	4,6	0,6	13,4	13,2	0,8	—	—	—	—	—	—	12,6	4,6	0,4
4	9,8	—	—	9,0	7,4	0	12,0	5,0	0	—	—	—	1,0	6,0	0
5	9,6	8,0	0	9,4	8,4	0	9,6	7,8	0	10,2	7,3	0	10,2	6,8	0
6	14,2	4,2	0	11,4	5,6	0	12,4	4,0	1,0	14,6	2,1	0	14,6	2,0	0
7	12,0	0,3	0	12,4	1,0	0	12,0	0,6	0	11,4	0,8	0	11,6	0,6	0,6
8	12,4	3,6	0,4	12,8	3,3	0	12,6	3,4	0,4	11,0	5,6	0,2	11,4	5,0	0,2
9	12,0	4,2	0	12,0	4,8	0,2	11,7	4,6	0	11,8	5,8	0	11,9	4,8	0
10	15,0	1,0	0	13,6	3,0	0	14,0	1,6	0	12,2	4,2	0	13,6	2,0	0,4
11	11,8	6,0	0	9,0	8,4	0	11,8	5,4	0	11,6	6,0	0	11,0	6,6	0

Таблица 11

по горизонту 0,4

№ верти- кали	Пламя слева														
	Время от перекидки (в мин.)														
	6			12			18			24			30		
	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
1	—	—	—	—	—	—	12,6	6,0	1,6	12,4	4,6	0,5	10,4	8,4	0,6
2	12,8	1,8	0,1	12,8	2,5	0	13,4	3,0	0	12,0	5,0	0	11,8	4,6	0
3	12,2	4,8	0	13,6	2,2	0	13,4	1,6	—	13,0	—	—	15,0	1,0	0
4	11,0	5,0	0,5	8,4	5,0	2,0	10,0	4,0	1,0	12,0	4,0	1,0	12,0	4,0	1,2
5	9,6	8,7	0	9,2	8,0	0	9,4	8,6	0	9,2	8,8	0	9,2	8,1	0
6	15,0	1,8	0	15,0	2,0	0	15,0	1,8	0	15,4	1,8	0	14,0	2,0	0
7	11,7	0,7	1,8	11,9	0,9	0,8	12,4	0,3	0,7	12,0	1,5	1,5	12,8	1,0	0,6
8	11,6	4,0	0,4	12,8	4,2	0,1	8,4	2,0	1,2	12,3	5,0	0	11,0	6,0	0
9	11,5	5,1	0	11,8	4,2	0,8	11,6	4,7	0	12,2	4,0	0	12,4	4,0	0
10	13,8	2,2	0	13,6	2,5	0	14,0	1,8	0	14,6	1,4	0	14,2	1,8	0
11	15,0	2,0	0,2	13,6	4,2	0,1	12,2	5,2	0	11,0	6,8	0	10,6	7,4	0

ризонт 0,6, рис. 23). Как можно видеть из указанных диаграмм, по периферии печного пространства замечаются минимальные содержания O₂ в пределах 1—4%. Большинство максимальных значений O₂ (8—10%) приходится на правую горелку (газ справа), что указывает на большой избыток воздуха при работе данной

№ верти- кали	Пламя справа														
	Время от перекидки (в мин.)														
	6			12			18			24			30		
	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
1	13,0	3,8	0	11,2	7,6	0,1	13,8	2,6	0	9,0	7,8	1,3	13,8	2,0	0
2	11,9	5,4	0	11,0	7,0	0	11,6	6,0	0	11,8	5,4	0	11,8	5,4	0
3	10,2	7,4	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	13,0	3,0	0	13,4	3,0	0	13,0	4,5	0	15,0	3,0	0	14,0	4,0	0
5	11,8	5,4	0	8,0	10,6	0	7,8	11,2	0,1	11,4	0,4	0	11,0	7,7	0
6	14,3	1,7	0	14,0	1,6	0	14,0	1,8	0,2	14,0	1,4	0	14,0	1,6	0
7	12,8	1,0	1,8	12,6	1,2	1,6	13,1	1,0	1,2	12,6	1,4	1,4	13,0	1,0	1,8
8	14,6	1,4	0	14,2	1,2	0	14,8	1,5	0	14,0	2,0	0	14,6	1,4	0
9	14,0	2,6	0	13,8	3,0	0	12,8	3,4	0	13,9	2,9	0	13,2	3,0	0
10	15,0	1,6	0	14,6	0,6	0,2	15,0	1,0	0	14,8	0,8	0	14,8	1,0	0
11	16,8	2,2	1,3	15,0	1,4	1,0	14,8	2,2	0	14,6	2,4	0	14,4	2,7	0,1

№ верти- кали	Пламя слева														
	Время от перекидки (в мин.)														
	6			12			18			24			30		
	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
1	13,4	3,6	0,1	9,2	9,5	0	14,0	3,8	0,1	14,0	3,6	—	12,4	3,4	0
2	10,0	8,0	0	11,0	7,2	0	10,4	7,0	0	—	—	—	—	—	—
3	13,9	3,1	0	—	—	—	13,0	3,4	0	—	—	—	13,4	3,0	0
4	10,0	4,0	1,0	10,0	3,6	1,5	10,4	4,0	1,0	9,0	5,0	1,5	10,3	4,1	2,4
5	—	—	—	12,2	3,8	0	12,2	3,1	0	12,4	3,1	0,2	12,0	3,0	0
6	14,0	2,4	0,2	16,4	1,5	0	16,1	1,4	0	16,0	1,4	0	16,0	1,5	0
7	12,0	0,4	1,6	11,2	0,5	2,0	14,4	0,4	2,0	—	—	—	—	—	—
8	10,6	6,4	0	12,8	6,4	0	13,4	5,4	0,4	9,0	11,0	0	13,4	4,0	0
9	11,6	4,6	0	13,4	3,2	0	11,0	4,0	0	11,8	5,4	0	11,0	6,2	0
10	13,8	2,2	0	13,6	2,0	6,6	13,0	1,6	0	12,0	2,0	0,6	13,8	1,0	0,2
11	11,6	0,8	2,0	12,7	0,6	1,0	12,0	0,6	1,0	14,2	0,4	2,0	10,6	7,0	0

горелки. Частично отражение этого факта можно видеть в большем количестве O₂ в отходящих через левую горелку газах (рис. 4 и 5). На рис. 24а, 24б и 24в изображено распределение CO₂ по вертикальным, продольным сечениям (среднему и 2 боковым). Анализ этих диаграмм подтверждает асимметрию в ра-

Таблица 12

по горизонту 0,6

№ верти- кали	Пламя слева														
	Время от перекидки (в мин.)														
	6			12			18			24			30		
	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
1	15,0	3,4	1,2	15	3,6	0	12,8	3,2	0	13,6	4,4	0	13,0	5,2	0,2
2	12,0	5,2	0	14,8	4,8	0	11,0	6,8	0	10,6	7,2	0	10,0	7,4	0
3	—	—	—	15,4	2,1	0	—	—	—	15,1	2,0	0	—	—	—
4	10,5	4,5	1,2	9,4	4,4	1,2	9,8	5,2	1,0	10,0	4,0	3,0	10,0	4,5	0,2
5	11,5	6,2	0	11,3	5,8	0	11,2	6,2	0	10,9	5,9	0	10,3	6,9	0,8
6	14,0	2,0	0	13,0	4,0	0	12,2	4,8	0	14,0	2,6	0	13,4	3,1	0
7	12,8	1,0	1,8	12,6	1,2	1,6	13,0	1,0	1,2	12,6	1,4	1,4	13,0	1,0	1,8
8	10,4	3,8	0	12,6	3,4	0,4	11,4	2,1	0	12,6	3,7	0	8,0	2,8	0,4
9	9,8	8,11	0	13,6	4,0	0	14,6	2,2	0	12,5	4,9	0	—	—	—
10	14,0	0,8	0,8	14,0	1,6	0	14,0	0,8	0,2	14,8	0,8	0	14,4	0,6	0
11	13,3	3,6	0	12,5	7,5	0	10,6	6,6	0	10,4	6,2	0	10,6	7,4	0

Таблица 13

по горизонту 0,8

№ верти- кали	Пламя справа														
	Время от перекидки (в мин.)														
	6			12			18			24			30		
	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO	CO ₂	O ₂	CO
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	9,0	11,0	6	—	—	—	7,0	11,6	0	—	—	—	7,9	10,0	0
4	12,0	4,0	0	11,8	7,2	0	12,2	3,8	0	12,8	4,0	0	13,0	3,8	0
5	11,2	6,7	0	10,0	8,8	0	9,2	8,6	0	10,5	8,0	0	9,6	8,0	0
6	12,4	4,0	0,6	12,0	5,4	0,2	12,2	4,4	0,2	12,4	4,6	0	12,2	4,6	0
7	16,0	0,8	0	16,5	0,9	0	15,2	1,5	0	15,2	0,8	0,8	15,4	0,6	0,2
8	15,0	0,5	0	14,4	1,6	0	14,4	0,8	0,2	14,0	1,6	0	14,0	1,2	0
9	12,2	2,2	0,2	11,2	1,4	0	13,0	1,2	0	14,6	2,0	0	15,6	1,4	0
10	14,4	1,2	0	12,8	3,2	0	13,0	3,4	0	13,8	2,0	0	13,8	2,2	0
11	14,0	1,8	0	14,0	2,2	0	14,0	2,0	0	14,2	2,0	0	13,3	2,9	0

боте горелок. При работе правой горелки максимум CO₂ получается в выработочном бассейне, постепенно переходя туда в продолжение полупериода; при работе левой максимум получается на правой стороне, примерно, у экрана, причем время почти не влияет на местоположение фокуса горения.

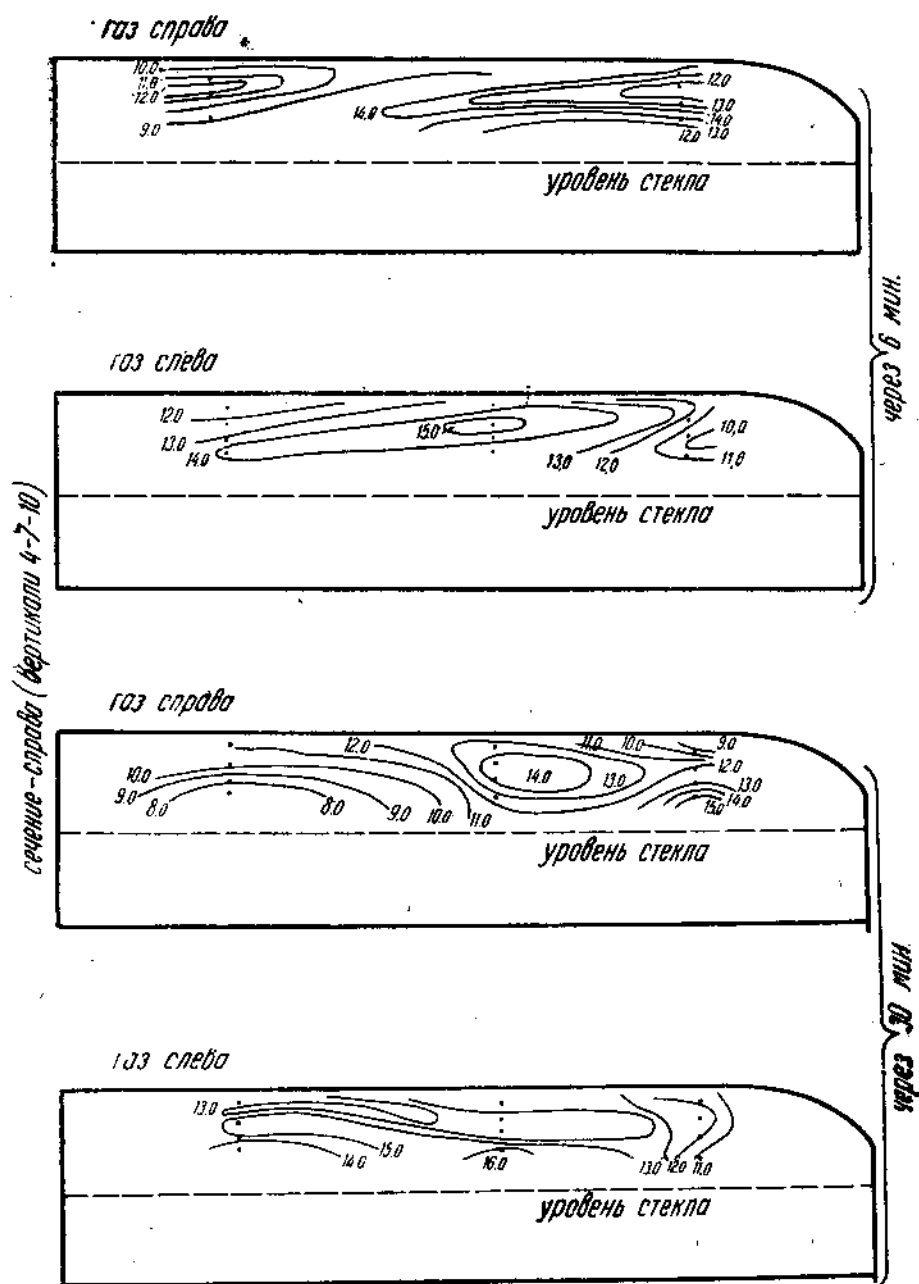


Рис. 24а. Распределение CO_2 в вертикально-продольных сечениях газовой зоны.

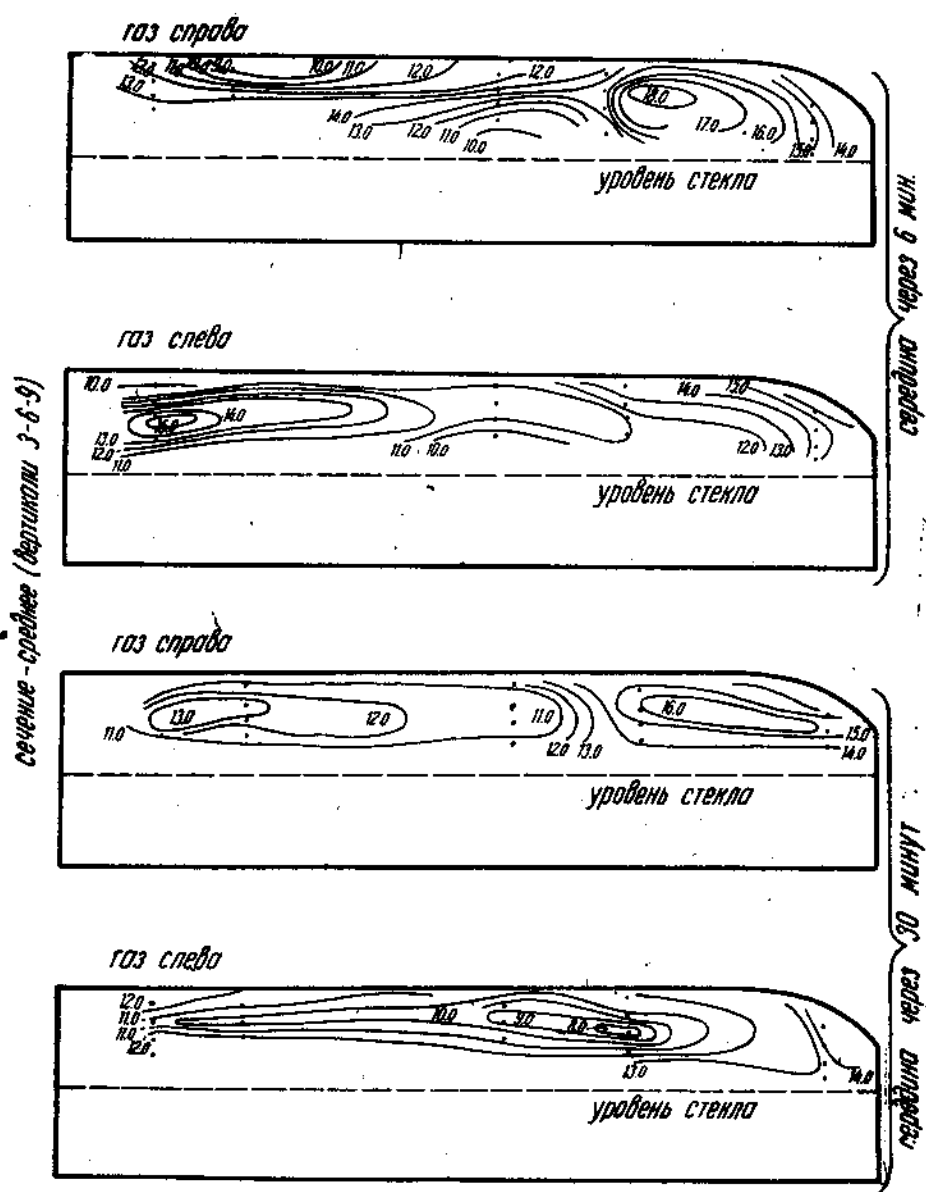


Рис. 246. Распределение CO_2 в вертикально-продольных сечениях газовой зоны.

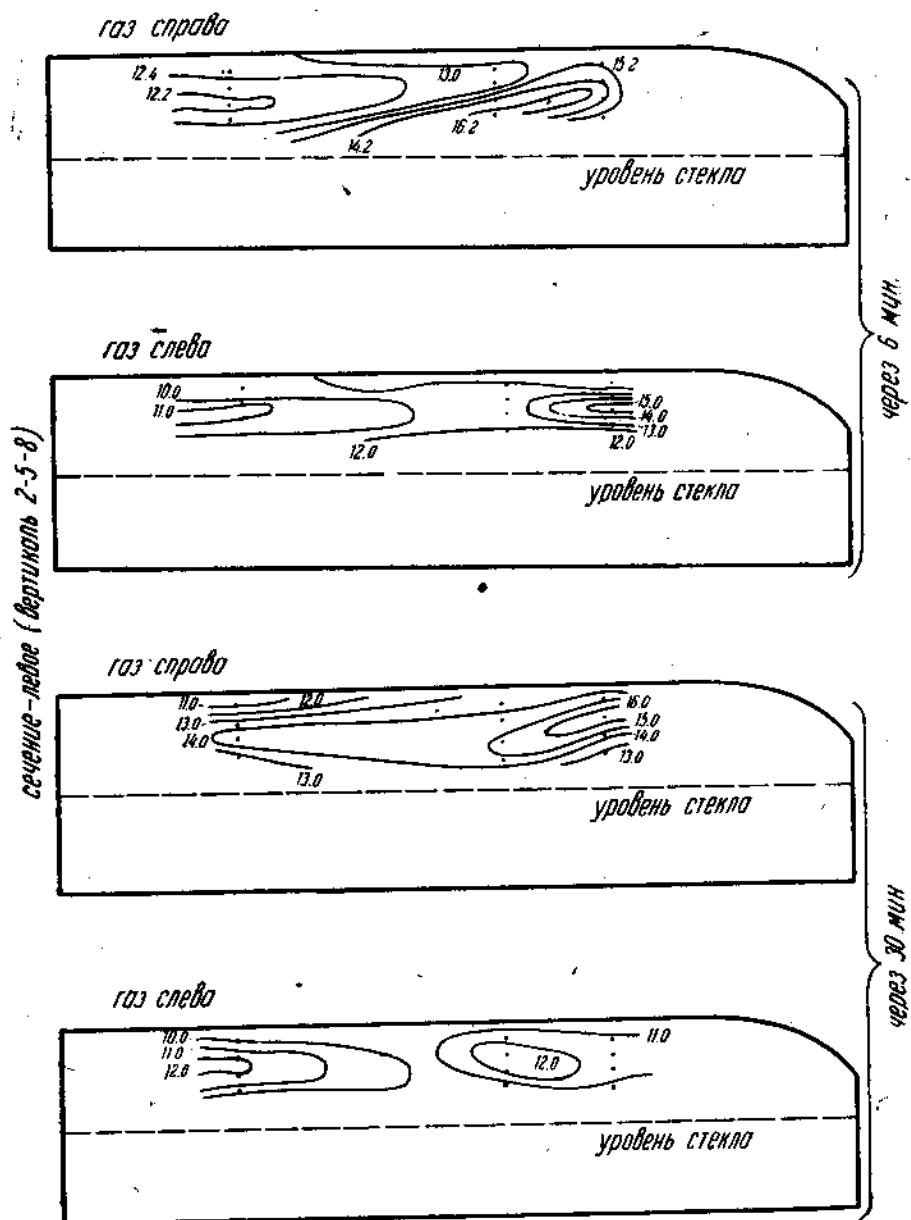


Рис. 24в. Распределение CO_2 в вертикально-продольных сечениях газовой зоны.

3. Гидродинамическая характеристика газовой зоны

Распределение давлений в печном пространстве и абсолютное значение последних представляет интерес прежде всего с точки зрения рационального расхода топлива, поскольку излишнее давление или разрежение влечет за собой повышенный расход горючего. Кроме того этот режим определяется и методами отопления и поэтому частично обуславливается конструкцией (и работой) регенераторов и горелок.

а) С точки зрения распределения и изменения давления по глубине следует сопоставить отдельные пункты пути факела и части бассейна; по этому принципу выбраны вертикаль 1 (сечение I), 2 и 4 (сечение II), 6 (сечение III) и 11 (сечение V). Из рис. 25 можно сделать следующие выводы (табл. 14).

Таблица 14-а

Распределение давлений по горизонту 0,2

№ верти- кали	Пламя справа					Пламя слева				
	Время от перекидки (в мин.)									
	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30
1	+1,6	+1,6	+1,6	+1,6	—	+1,7	+1,4	+1,6	+1,7	+1,8
2	1,6	1,6	1,5	1,3	2,0	1,0	1,6	1,2	1,2	1,2
3	1,0	0,8	1,0	1,2	1,2	0,3	0,6	0,8	0,8	0,9
4	0,8	1,4	1,0	1,2	1,4	0,8	0,6	1,0	0,8	1,0
5	2,6	1,6	1,6	4,0	2,5	1,0	0,8	2,2	2,0	4,0
6	2,3	1,8	2,0	1,4	1,6	2,2	4,8	3,8	2,8	1,9
7	1,4	2,2	2,2	3,4	2,7	1,0	1,4	1,0	1,3	1,4
8	5,4	3,4	1,8	5,6	6,8	7,8	8,0	6,4	7,8	3,2
9	6,4	5,2	2,0	6,4	2,2	3,4	6,2	3,4	4,0	—
10	1,4	1,0	1,0	1,3	1,6	3,7	4,0	3,6	2,6	5,0
11	1,0	2,0	2,6	5,6	5,2	0,6	—	1,6	3,0	3,0

Таблица 14-б (продолжение)

Распределение давлений по горизонту 0,4

№ верти- кали	Пламя справа					Пламя слева				
	Время от перекидки (в мин.)									
	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30
1	+2,2	+2,2	+2,2	+2,1	+1,8	—	—	+1,8	+1,8	+1,9
2	3,8	5,6	0,2	9,0	6,0	3,6	2,8	4,6	6,1	5,6
3	9,0	1,1	1,2	1,4	2,4	3,2	1,2	1,2	1,4	1,4
4	1,8	2,5	1,8	2,0	1,8	0,7	0,9	1,0	1,2	1,0
5	1,8	5,6	6,0	5,2	4,7	9,0	9,6	7,4	6,5	9,2
6	1,2	2,7	1,6	1,7	2,0	1,7	1,5	3,0	5,2	5,7
7	5,2	4,0	2,2	6,2	10,0	1,7	4,6	3,1	2,6	3,2
8	12,8	6,8	6,0	13,2	5,2	8,2	4,8	6,2	15,0	2,4
9	11,0	7,4	11,3	8,7	10,2	7,0	10,7	10,4	10,5	9,4
10	1,5	1,0	1,5	0,8	1,7	2,0	1,4	1,8	1	1
11	3,4	3,6	2,4	2,6	1,4	1,4	1,4	3,4	4,4	1,4

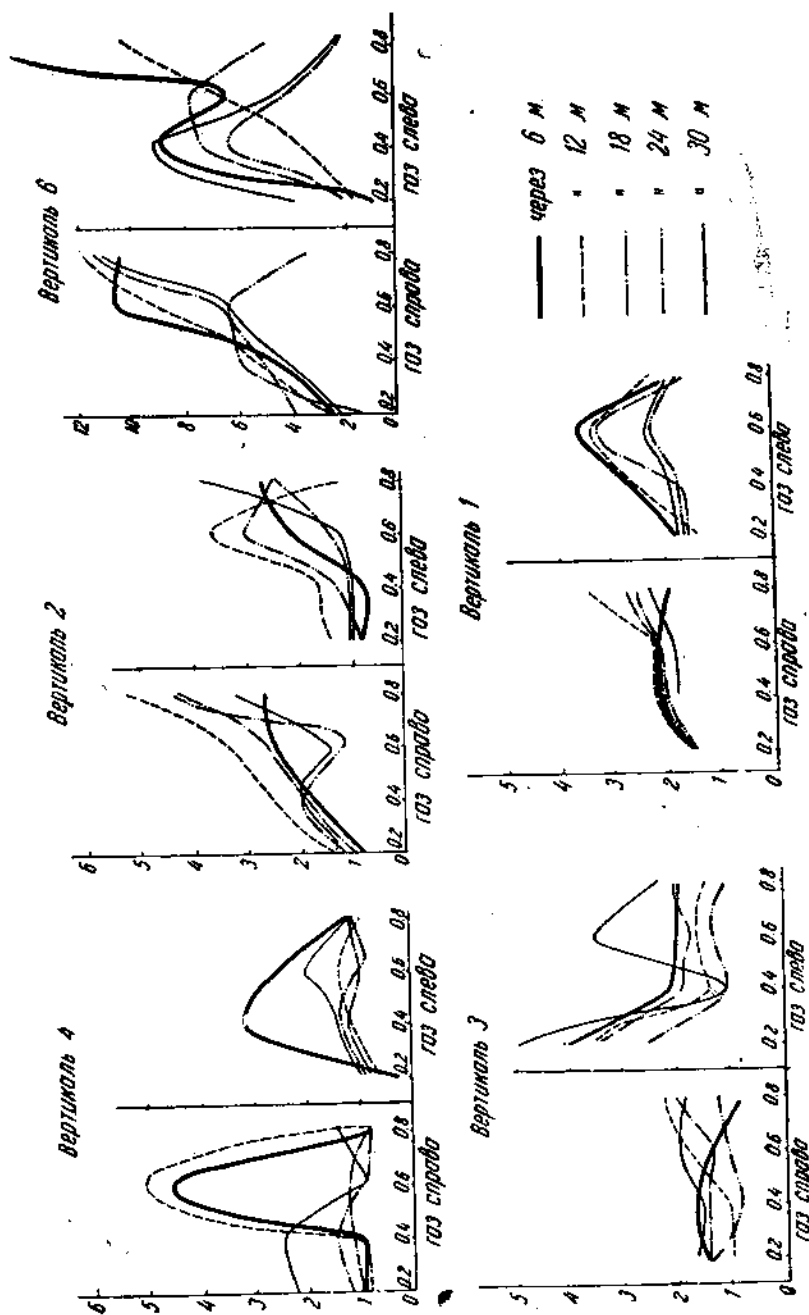


Рис. 25. Изменение давлений по высоте и времени по 5 вертикалям газового пространства.

Таблица 14-в (продолжение)
Распределение давлений по горизонту 0,6

№ верти- кали	Пламя справа					Пламя слева				
	Время от перекидки (в мин.)									
	6	12	18	24	30	6	12	18	24	30
1	2,2	2,2	2,2	2,2	1,9	3,7	3,5	3,4	2,3	2,4
2	10,0	9,4	8,8	10,0	7,6	9,4	8,6	11,0	8,2	9,4
3	4,6	5,0	1,2	0,8	0,8	2,6	1,4	1,0	1,0	2,0
4	2,6	3,4	2,6	1,2	1,4	2,2	3,6	1,4	3,0	1,2
5	10,8	9,2	5,4	5,6	5,6	5,3	5,2	7,8	4,3	4,8
6	5,6	1,6	5,6	1,9	1,4	1,4	1,3	3,6	3,8	3,2
7	1,8	4,6	0,8	2,2	2,8	8,4	1,2	2,8	4,7	4,0
8	17,0	13,8	14,2	12,8	19,4	10,8	17,0	12,6	15,4	19,0
9	9,2	7,6	8,4	3,8	6,7	6,5	5,6	5,0	5,8	4,0
10	1,5	1,8	1,4	1,0	2,0	2,0	1,6	1,2	1,2	3,6
11	2,6	2,0	1,6	1,4	2,6	1,6	1,6	2,2	1,4	1,4

При работе правой и левой горелкой режим давления резко меняется, что следует объяснить различной работой форсунок (горелок).

Ближайший к своду горизонт характеризуется давлением в 1—2 мм и является одинаковым по всем протяжениям ванны.

Ю мере приближения к стекломассе давление, как правило, растет, но строгой закономерности в этом усмотреть нельзя.

При работе левой горелки середина давления выше, чем при работе правой.

Обращают на себя внимание высокие значения давлений, достигающих до 16—19 мм H_2O^1 .

Анализируя карту изобар, где нанесены давления по горизонтам, находим, что они дают наиболее правильную и симметричную картину, сохраняя рисунок и на протяжении времени и вне зависимости от направления факела (гориз. 0,6). (Изобары — см. рис. 26, 27, 28 и 29.).

Наличие одного или двух максимумов по средней линии (оси) печи позволяет сделать заключение о получении газового вихря (антициклона), тем более что локализация этих точек с максимумом значения давления совпадает либо с поворотом факела (вертикали 6—9), либо происходит у горелок, где образуется вращение газов за счет противоположно и параллельно направленных газовых потоков (влет и вылет газов) у вертикалей 1—3. Частота расположения изобар в выработочной части является признаком того, что наличие экрана, поворот газов и расширение

¹ Следует оговорить, что отдельные высокие значения давлений могут получаться вследствие не совсем точной ориентировки трубки, помещенной открытым концом в печное пространство; при косом направлении газового потока может получиться возрастание давлений за счет скоростных напоров; однако анализ графиков не позволяет всецело величину давления отнести за счет последнего фактора.

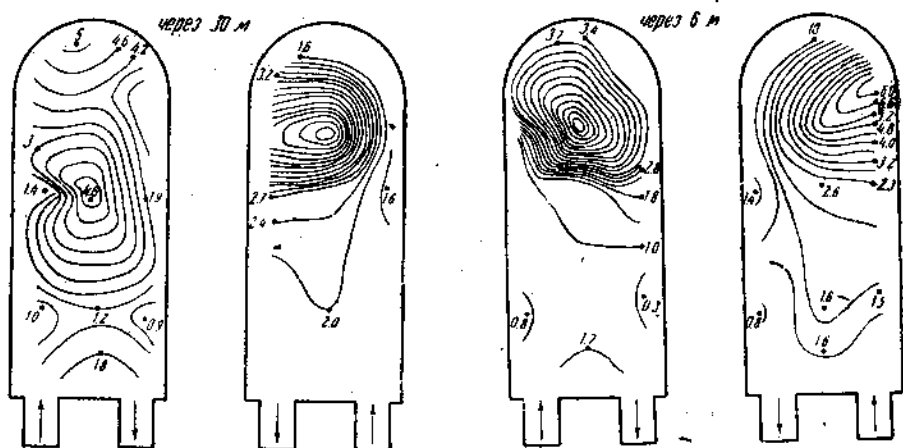


Рис. 26. Изобары в пламенном пространстве по горизонталн 0,2.

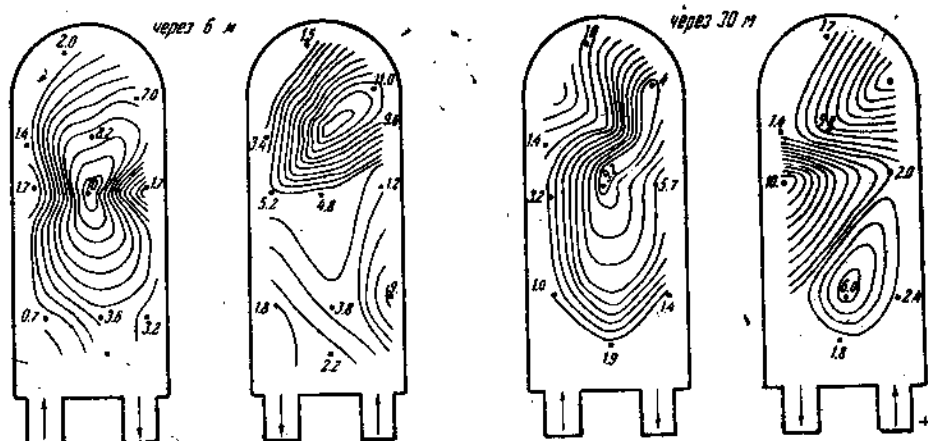


Рис. 27. Изобары в пламенном пространстве по горизонталн 0,4.

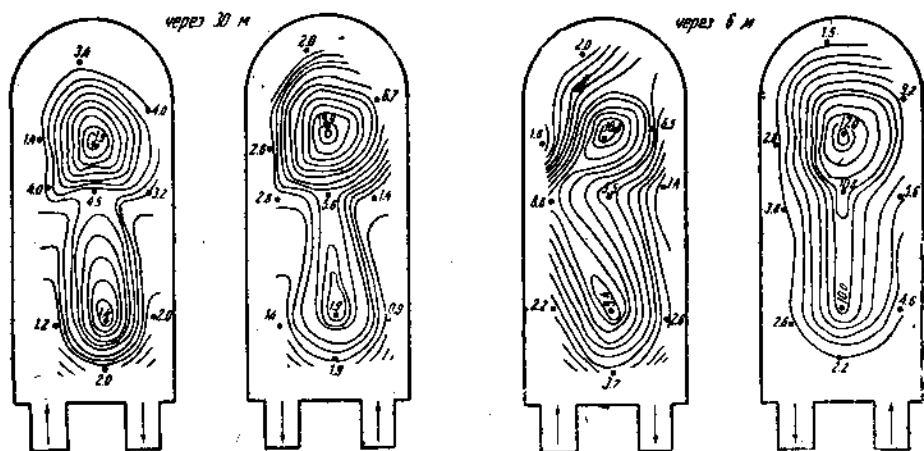


Рис. 28. Изобары в пламенном пространстве по горизонталн 0,6.

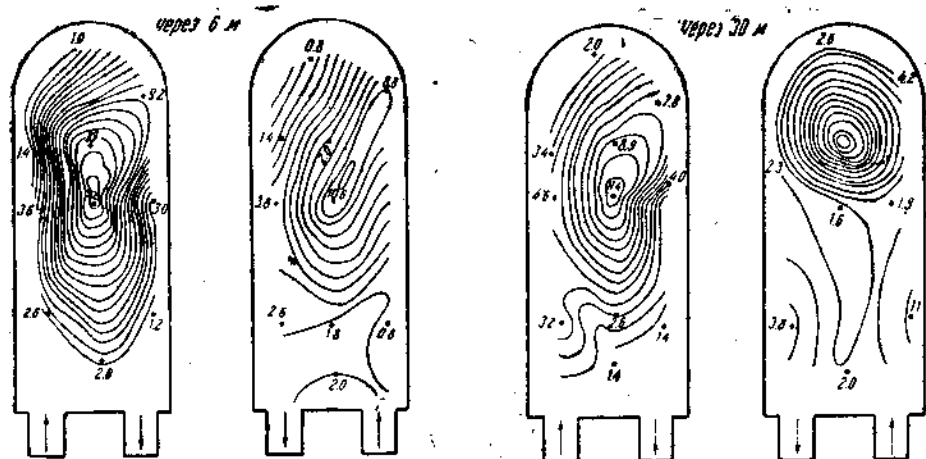


Рис. 29. Изобары в пламенном пространстве по горизонтали 0,8.

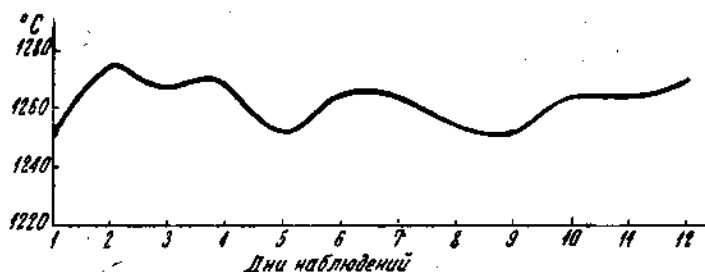


Рис. 30. Температурный режим выработочной части ванной печи по показанию контрольной термопары.

их от полного сжигания, локализуясь в одном месте, обуславливают наличие наибольших сопротивлений, преодоление которых требует повышенных давлений. Вместе с тем из карт изобар ясно, что печь работает под положительным давлением и что следует опасаться выбивания газов из отверстий, во избежание чего необходимо плотное закрытие всех свободных отверстий. Поскольку печь обслуживается фидером, это мероприятие может быть легко осуществимо, тем более что горизонт 0,8 все же еще сравнительно далек (0,35—0,45 м) от зеркала стекломассы и вспомогательные отверстия невысоки, и, несмотря на высокие давления, у самого зеркала можно ожидать подсоса наружного воздуха (у нижнего края юкна). Статистическая обработка полученных данных показывает, что средневзвешенный процент O_2 на горизонте 0,8 по всей площади бассейна за все время 3,2—3,9, в то время как у свода (горизонт 0,2) этот процент равен 4,0—4,1; это можно объяснить лишь подъемом наверх газов, сгоревших с большим избытком воздуха.

На время исследования в ванне поддерживался одинаковый режим, что контролировалось показаниями термопары, стоявшей

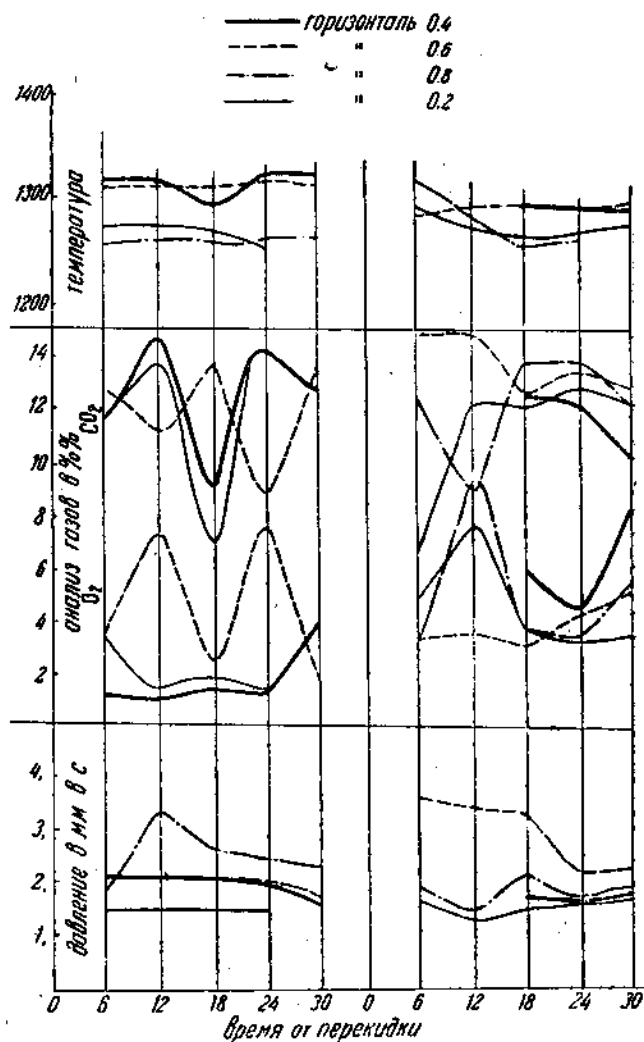


Рис. 31. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 1.

в выработочной части, температурой отходящих газов, расходом нефти и количеством поступающей шихты и вырабатываемой стекломассы. На рис. 30 показаны данные контрольной термопары.

Для суждения о совместном изменении во времени рассмотренных параметров газового пространства приводятся рис. 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 и 41, где изображены изменения за оба полупериода температур, состава газа и давления по исследованным 11 вертикалям (44 точки).

На рис. 42 и 43 дана аксонометрическая диаграмма изменения исследованных характеристик газовой среды.

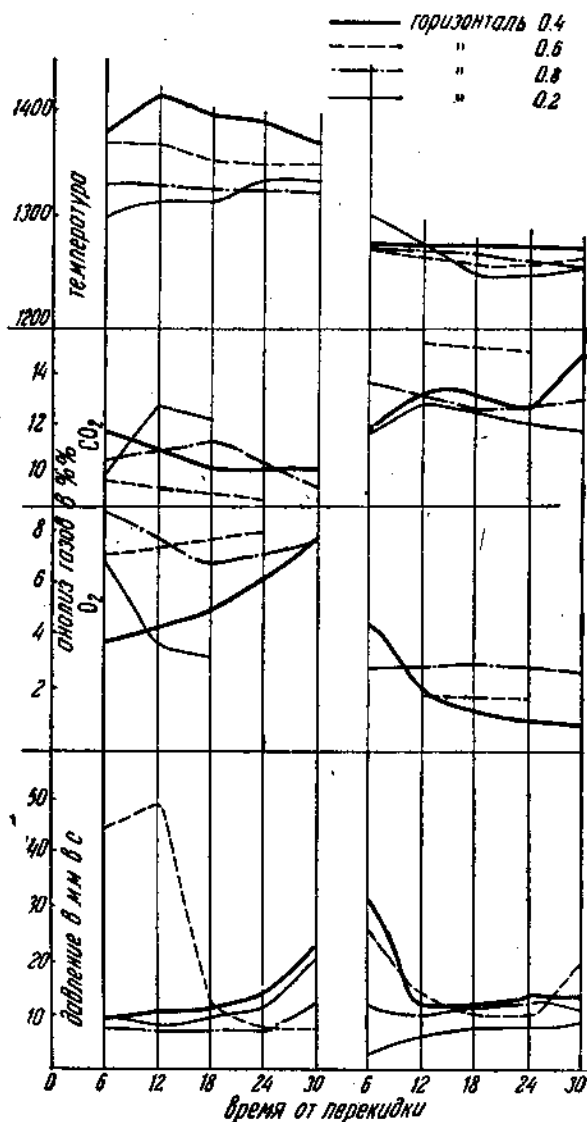


Рис. 32. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 2.

В. Характеристика теплового режима стекломассы

Как уже указано в вводной части, изучение теплового режима стекломассы производилось 2 методами — поверхностным и глубинным пирометражем.

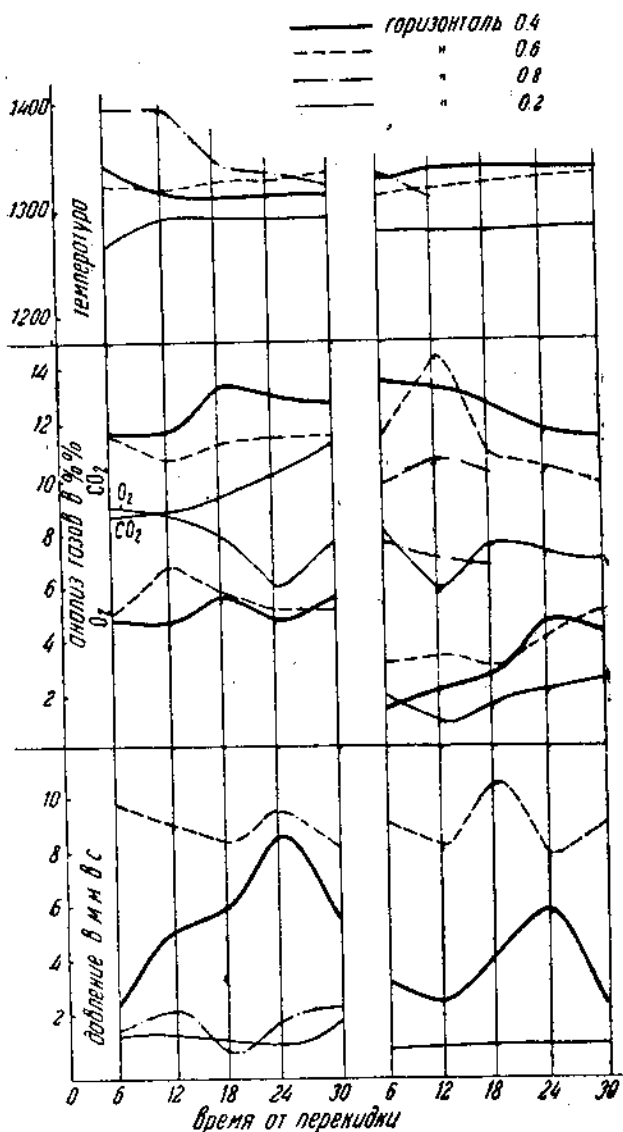


Рис. 33. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 3.

1. Распределение температур в поверхностном слое

Распределение температур по поверхности изучалось при помощи «поверхностного» пирометра проф. В. Э. Бромлея, конструкция которого описана и показана в следующих статьях.

При помощи данного прибора, обладающего значительной сво-

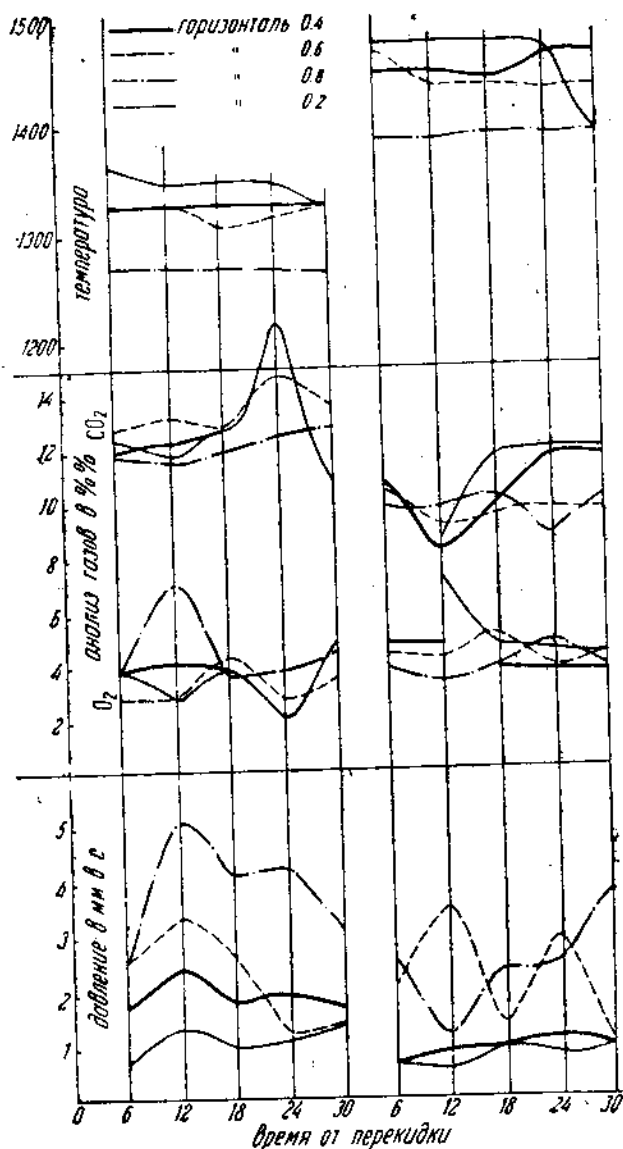


Рис. 34. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 4.

бодой управления по сравнению с типом аналогичного прибора, использованного при работе ГЭИС на заводе Зеркалокомбината¹, являлось возможным измерять температуры на 2 горизонтах —

¹ См. «Изучение теплового режима ванны Фурко с суженным перешейком». Труды Т. О. ГЭИС, 1933.

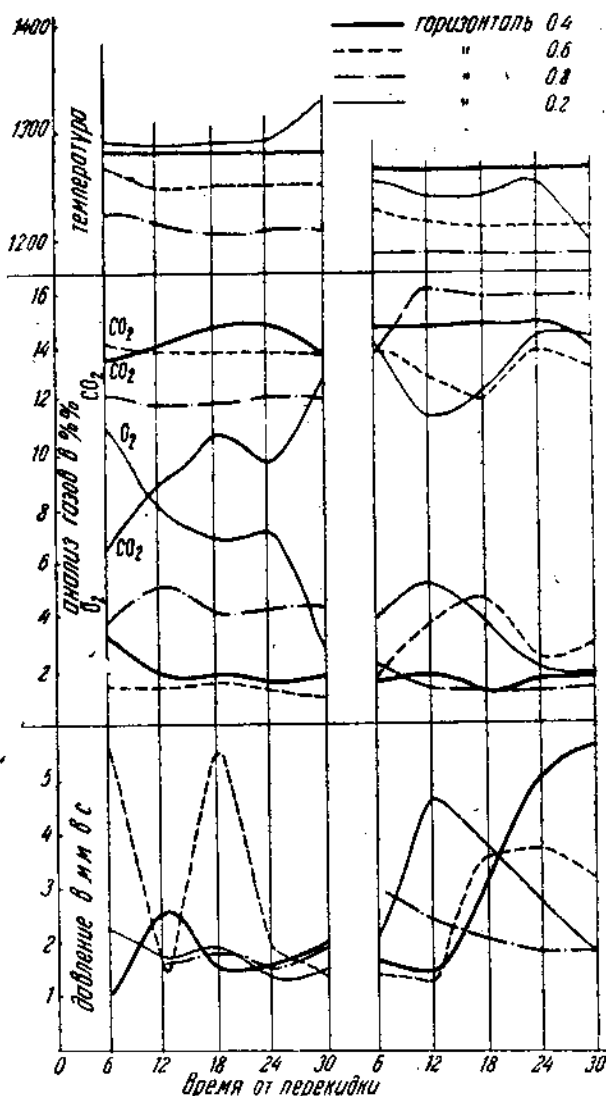


Рис. 35. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 5.

2 см и 12 см; более глубокие слои исследовались глубинным пирометром, что будет описано ниже. Так как до сечения Ie (считая от выработки) еще находилась на поверхности стекломассы непроваренная шихта, представлялось ненужным измерять поверхностные температуры в этой части варочного бассейна. Поэтому линии измерения были отодвинуты до сечения IIe и проводились по I и II, находящихся на расстоянии 15 и 45 см от поверхности перешеечной стенки (рис. 1). Отсчет тем-

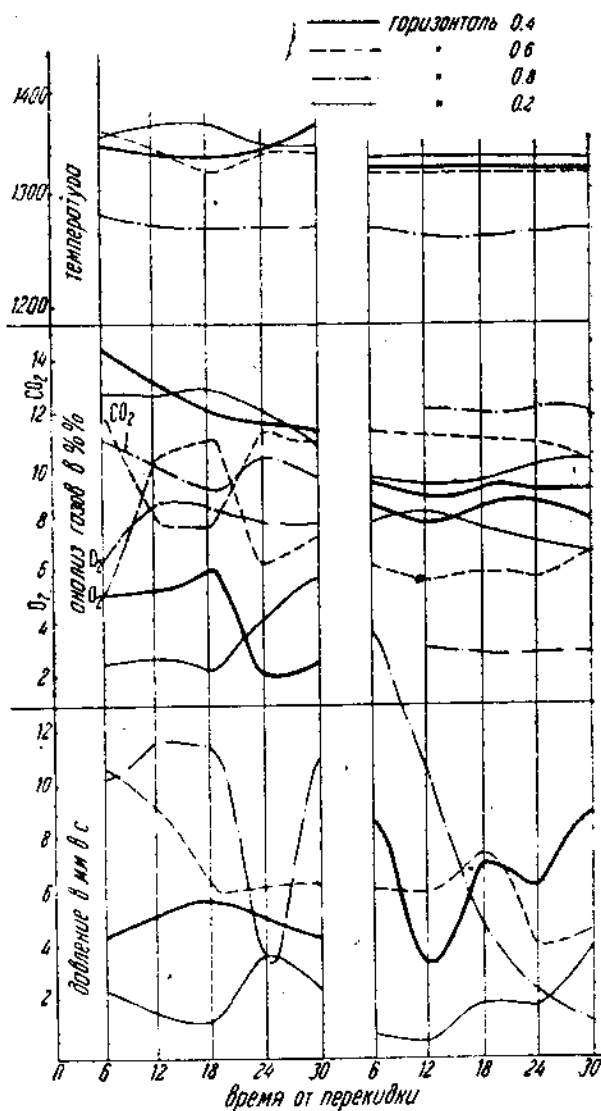


Рис. 36. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 6.

ператур производился на двух глубинах (2 и 12 см) через горизонтальный интервал в 0,25 м, т. е. было намечено 19 точек по горизонту, или всего 38 точек.

В выработочной части измерение производилось через два окна (№ 3 и 4): через № 3 — по трем «лучам» и через № 4 — по двум «лучам» с теми же интервалами, что и в варочной части.

Таким образом здесь получено 69 точек по одному горизонту и 136 — по обоим на пространстве около 10 м², что является

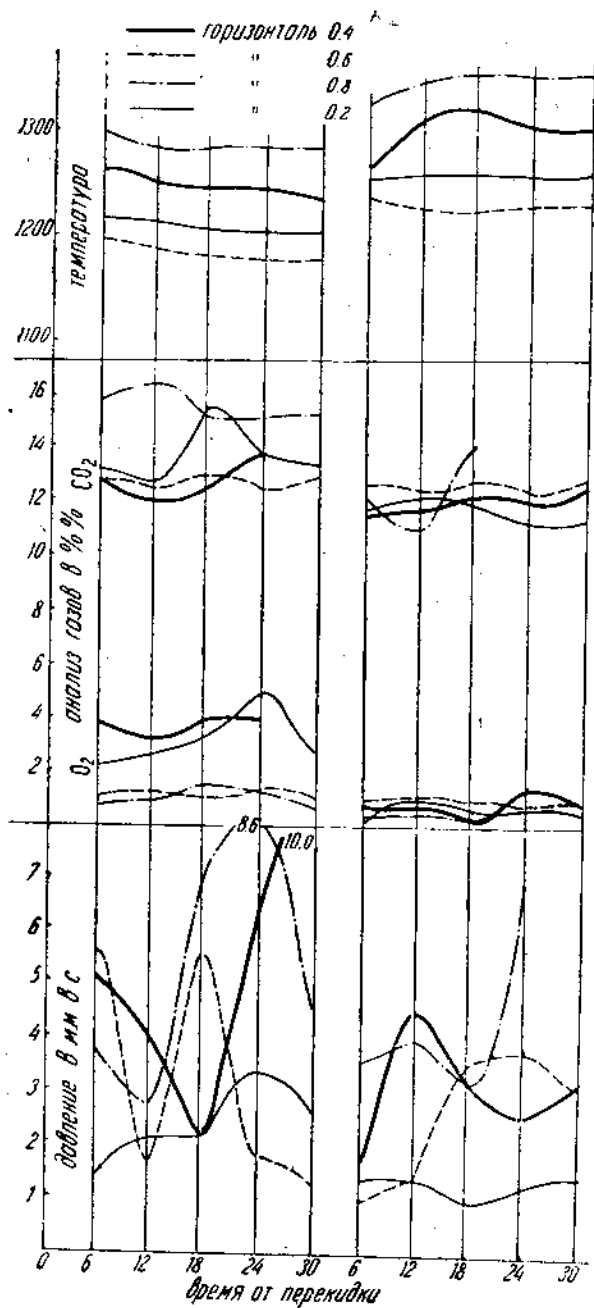


Рис. 37. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 7.

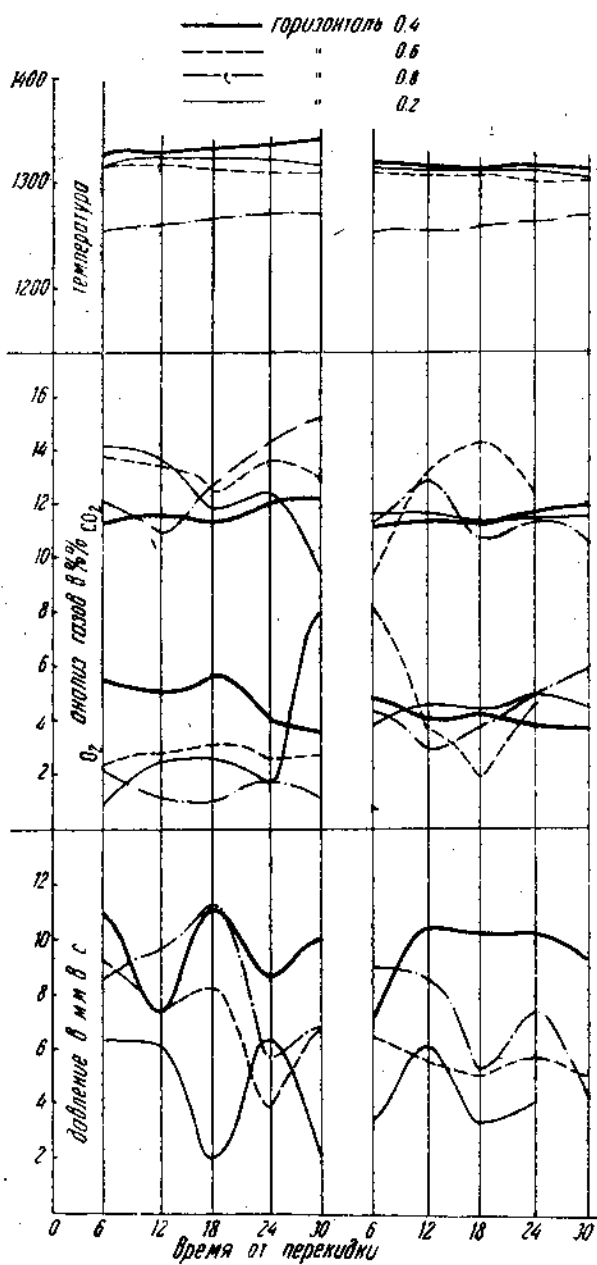


Рис. 38. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 8.

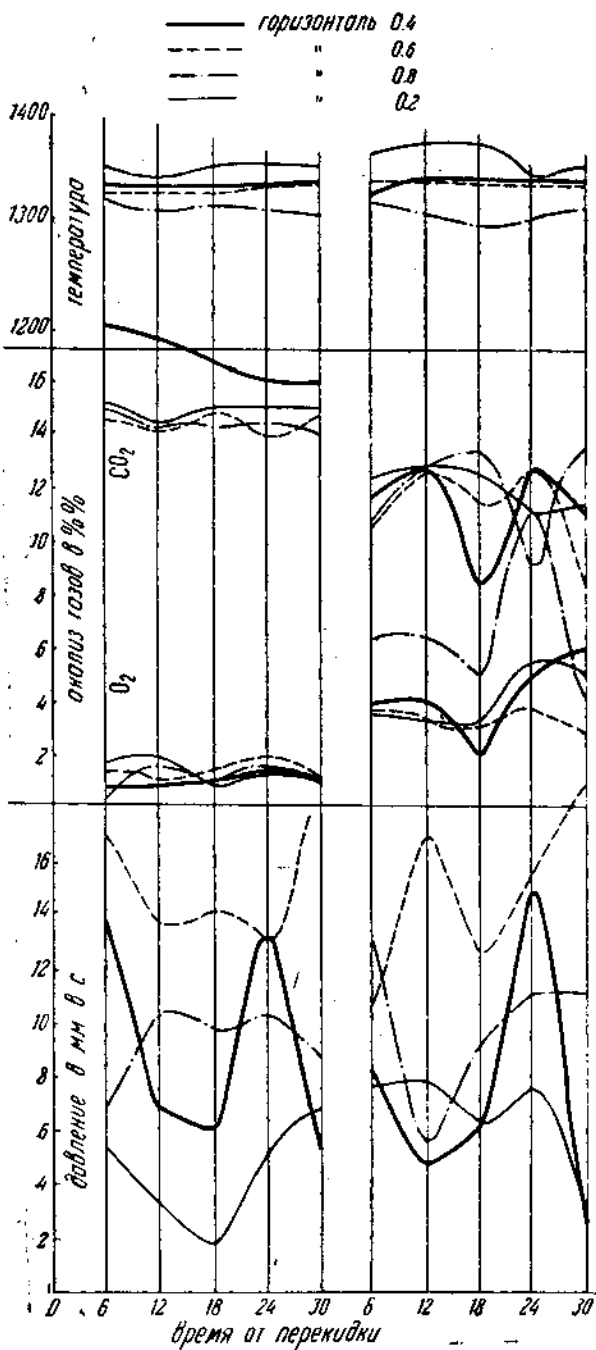


Рис. 39. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 9.

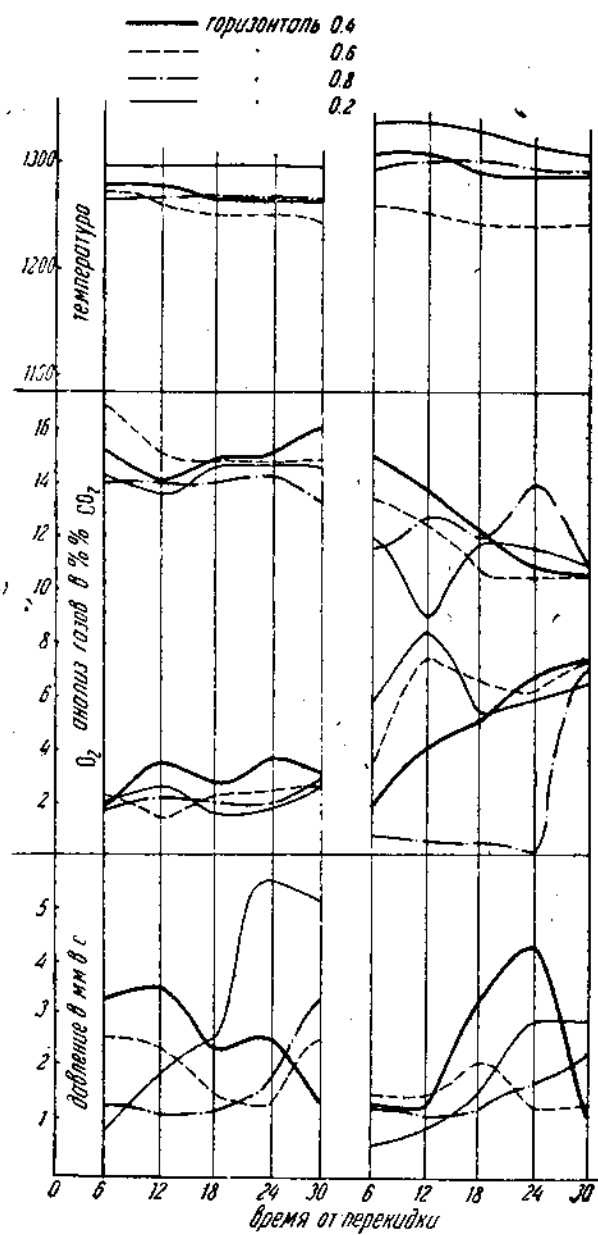


Рис. 40. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 10.

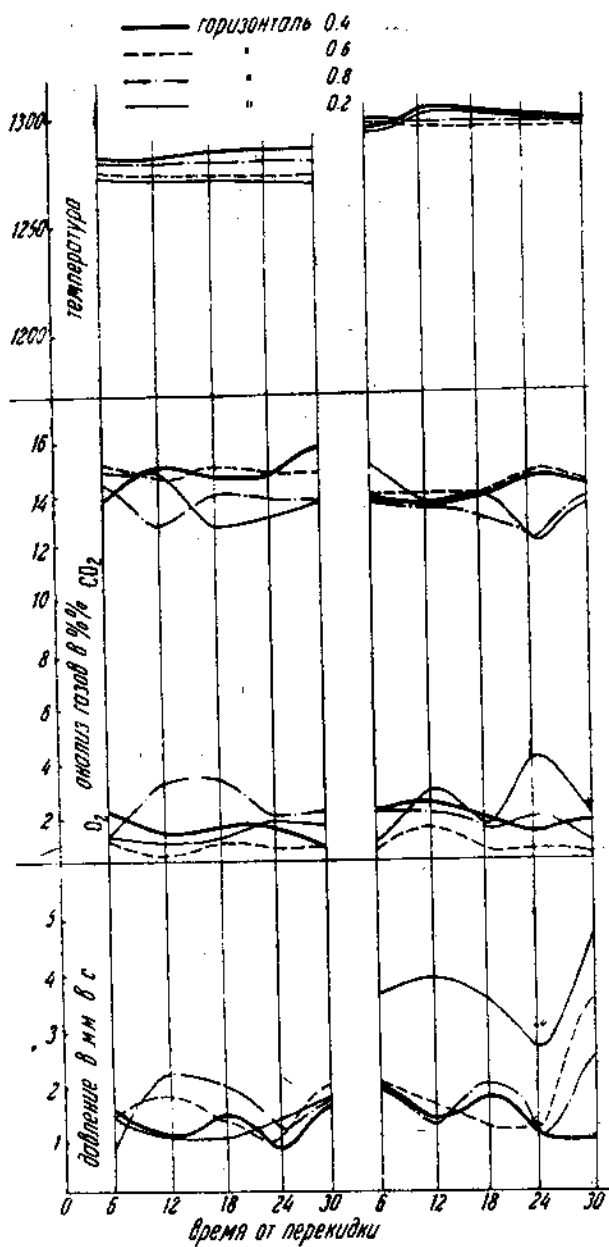


Рис. 41. Изменение температуры, состава газа и давления по вертикали № 11.

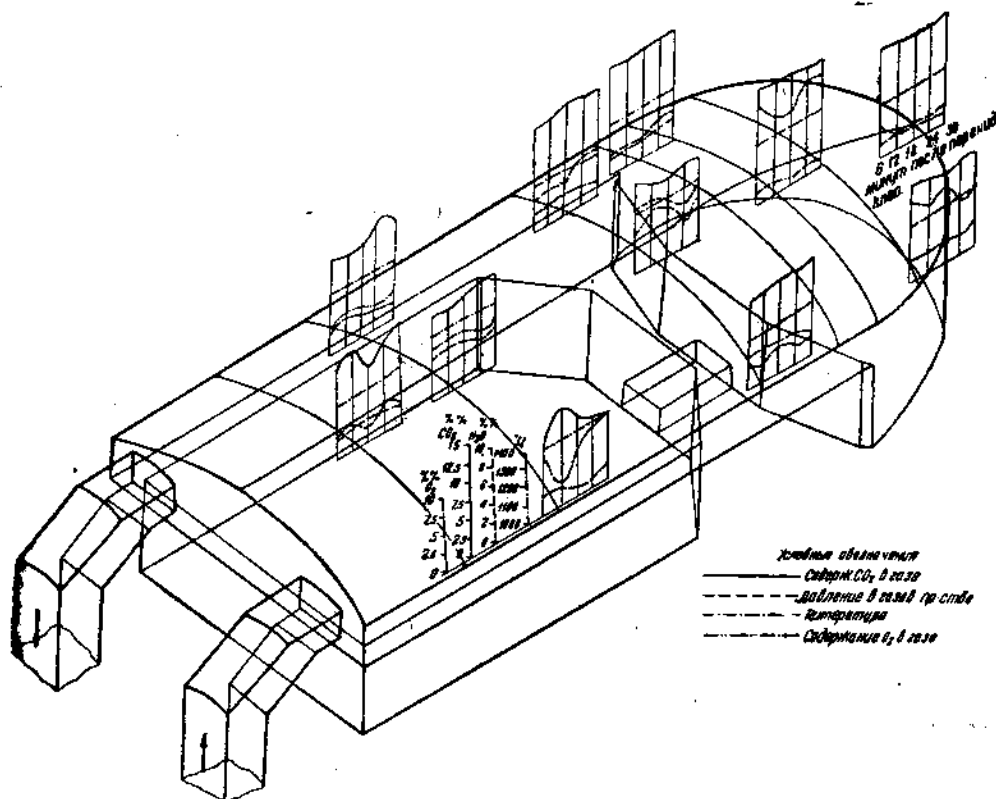


Рис. 42. Аксонометрическая диаграмма изменения исследованных характеристик газовой среды.

вполне достаточным. Расположение «лучей» IIIa, IVa, Va, VIa и VIIa видно на рис. 1.

а) В варочном бассейне, в зоне, непосредственно прилегающей к перешейку (сечения Ia—IIa), на поверхности (2 см) максимальные температуры наблюдаются в области около средней продольной оси, что иллюстрируется изотермической диаграммой 44.

Несколько смещенный вправо максимум может быть объяснен несколькими причинами: большим охлаждением левой стенки перешейка («срез» угла); временным переходом максимума газовых температур над поверхностью стекломассы на правую сторону; как уже указано, на горизонте 0,8 максимум газовых температур смещен налево, но эти измерения производились не одновременно. В общем положение максимума можно признать вполне нормальным; в дальнейшем его локализация будет сопоставлена с глубинным распределением. На глубине 12 см положение максимума сохраняется примерно тем же; абсолютное значение температур понижается на 8—15°, причем удельное падение увеличивается по направлению к стене перешейка: на луче Iа—6—

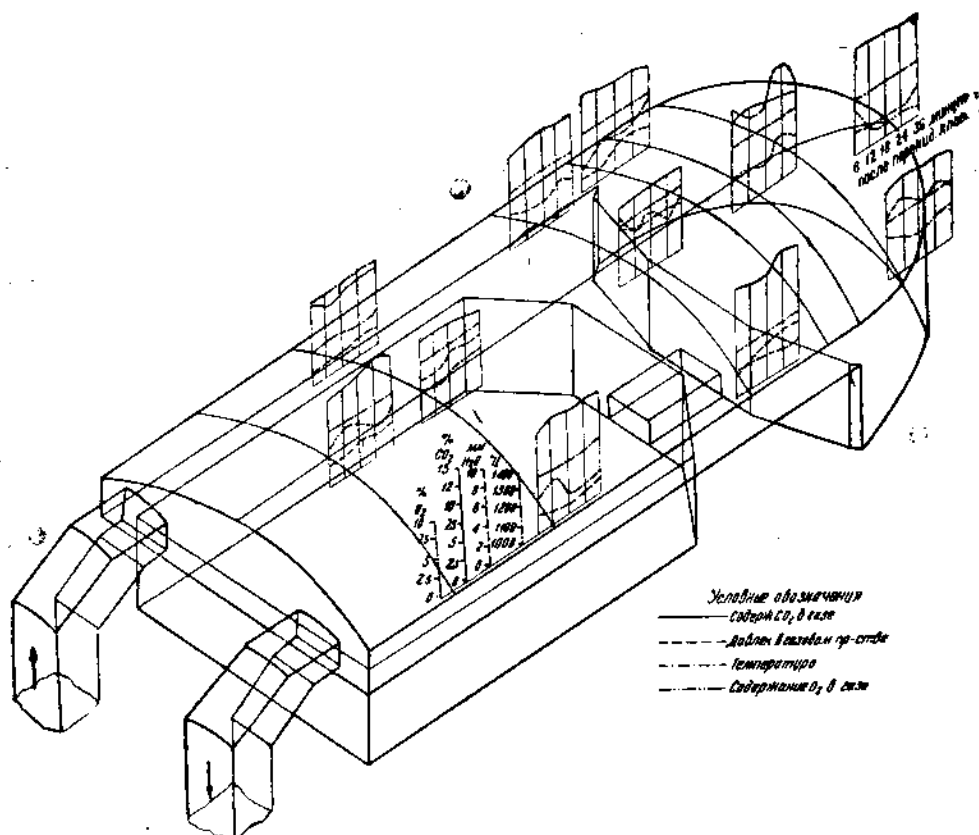


Рис. 43. Аксонометрическая диаграмма изменения исследованных характеристик газовой среды.

10° на 10 см ($0,6-1,0^\circ/\text{см}$), но по лучу II-a—13— 15° на 10 см ($1,3-1,5^\circ/\text{см}$). На рис. 45 представлены изотермы стекломассы на глубине 12 см.

6) В выработочном бассейне распределение температур в поверхностном слое представляет интерес прежде всего с точки зрения локализации в месте выхода потока («Quellpunkte»).

Анализ изотермической диаграммы 45 дает следующее:

1) Учитывая неизбежные ошибки наблюдения и корректируя их повторными опытами и контрольными сопоставлениями, легко установить наличие максимальных температур на поверхности в центре бассейна на расстоянии 1,2—1,5 м от края перешейчной стенки.

2) Распределение температур на глубине 12 см дает максимум ближе к перешейку, занимая место на геометрической продольной оси ванны.

3) Падение температуры по горизонтам, к периферии бассейна, не совсем равномерно, что объясняется перегревом левой

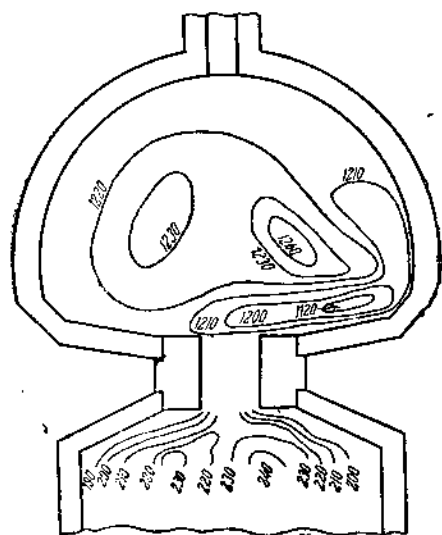


Рис. 44. Распределение температур в варочной части бассейна на поверхности.

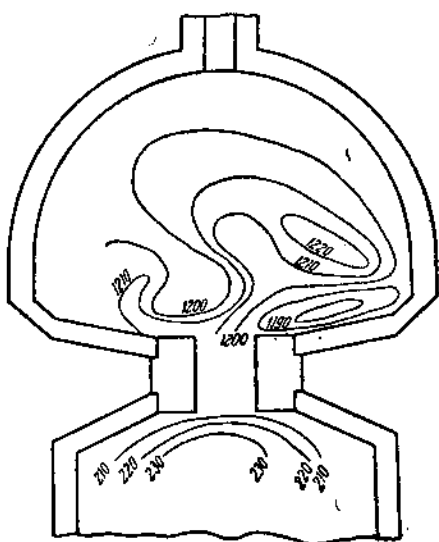


Рис. 45. Распределение температур в выработочном бассейне.

части газового пространства (рис. 7), поскольку весь поверхностный пирометраж производился при работе правой горелки.

4) Продольновытянутый рисунок изотерм, естественно, связывается с наличием центрального работающего фидера, оттягивающего стекломассу по средней продольной оси.

5) Удельное падение по глубине на 10 см меняется в радиальном направлении: по центральному радиусу максимум $1,8^\circ/\text{см}$ на расстоянии 1,5 м от перешейка, по правому — на расстоянии 0,8 м. По левому радиусу максимум устанавливается раньше всего на 0,6 м от перешейка. Величина максимума удельного падения температур примерно одна и та же $1,8-2,0^\circ/\text{см}$; по пути величина его меняется, особенно по правому радиусу, где на расстоянии 1,5 м падение изменяется до $1^\circ/\text{см}$. Сопоставляя это с абсолютной величиной температуры, следует сделать вывод, что как раз в этом районе стекломасса наиболее горяча (выход Quellpunkt'a).

Стабилизация падения температур по левому радиусу обязана поверхностному перегреву левой части выработочного бассейна.

Из указанных данных можно сделать вывод, что на глубине 12—15 см температура устанавливается в $1190-1200^\circ$ и не легко изменяется под действием перегрева (или охлаждения) газового пространства.

В табл. 15 приведены цифровые данные по измеренным температурам в поверхностном слое стекломассы.

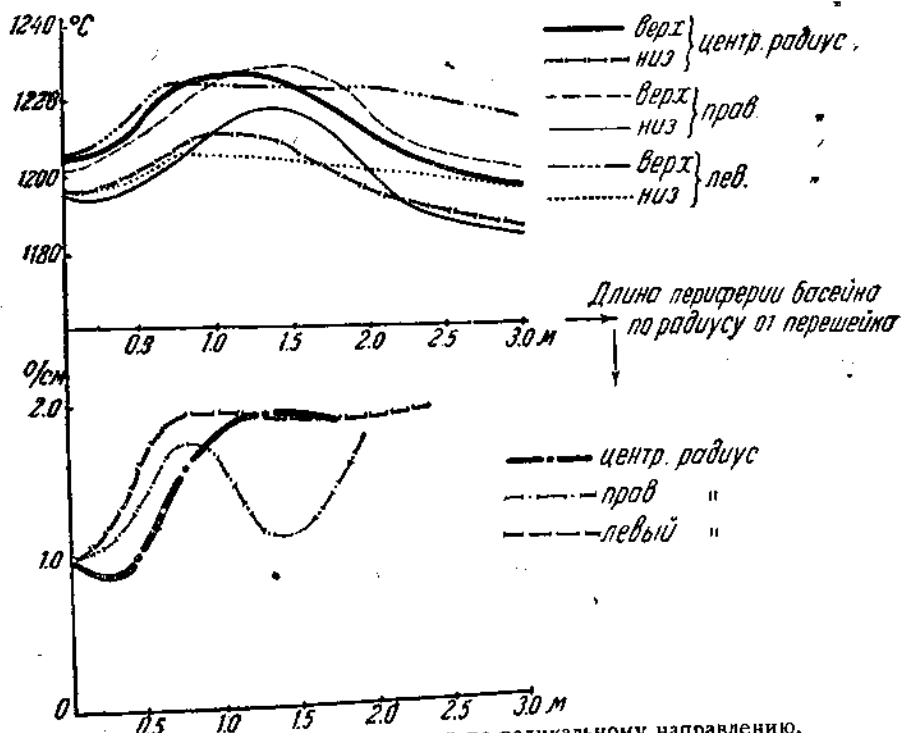


Рис. 46. Изменение температур по радиальному направлению.

Таблица 15
Распределение температур в стекломассе на глубине 2 и 12 см от поверхности

Части бассейна	№ точек														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Выработочная часть	1200	1201	1202	1218	1210	1220	1210	1210	1218	1230	1218	1220	1222	1220	—
	1188	1188	1188	1192	1198	1200	1199	1157	1199	1200	1200	1200	1201	1200	—
	1208	1210	1218	1225	1230	1239	1235	1228	1226	1222	1220	1222	1227	1230	1233
	1195	1196	1199	1205	1220	1319	1215	1208	1205	1210	1205	1200	1201	1204	1202
	1212	1223	1230	1230	1230	1227	1226	1226	1222	1224	1226	1202	1202	1225	1223
	1205	1208	1210	1209	1210	1210	1208	1209	1201	1207	1205	1206	1205	1208	1206
	1190	1200	1204	1208	1209	1205	1205	1208	1207	1212	1212	1217	1218	1222	—
	1183	1188	1190	1194	1196	1195	1197	1198	1200	1200	1200	1204	1206	1207	—
	1199	1202	1201	1208	1208	1210	1205	1305	1205	1207	1208	—	—	—	—
	1186	1190	1190	1196	1198	1195	1196	1194	1195	1198	1199	—	—	—	—
Варочная часть	1200	1214	1222	1225	1228	1200	1200	1191	—	—	—	—	—	—	—
	—	1210	1219	1220	1215	1220	1212	1201	—	—	—	—	—	—	—
	1219	1242	1238	1239	1238	1222	1229	1238	1210	1210	—	—	—	—	—

Примечание. Цифры, стоящие наверху, относятся к температурам на глубине 2 см, а стоящие внизу — к температурам на глубине 12 см от поверхности стекла.

2. Распределение температур по глубине

Этот вопрос изучен по ряду вертикалей, проходящих через слой стекломассы в 1 м, с интервалами через каждые 0,25 м. Всего измерено (рис. 1) 18 вертикалей по 4 точки на каждой; из них 6 вертикалей — в варочном и 12 — в выработочном бассейнах. Сечения I-с и II-с расположены на расстоянии 1,85 м и 0,55 м от перешейковой стены, а сечения III-с и IV-с — на расстоянии 0,5 и 0,8 м от той же стены со стороны выработки. В продольном направлении исследованные вертикали располагаются по сечениям I-в, II-в, III-в, IV-в, V-в и VI-в (рис. 1) с расстоянием между ними 0,5 и 0,6 м от боковых стен, причем вертикали на точках пересечения I-с и II-с, IV-в, V-в и VI-в остались неизученными вследствие невозможности ввести прибор с левой стороны печи. Получается пространственная сетка с 72 точками в объеме 13 м³ стекломассы, т. е. почти 6 точек на 1 м³.

Вследствие специфических условий наблюдения глубинный пиометраж фиксировался тогда, когда направление пламени совпадало с измеряемой частью бассейна (правая горелка — правая часть бассейна, левая горелка — левая часть).

а) Падение температур сверху вниз по отдельным вертикалям иллюстрируется рис. 47 и 48, где изображено падение температуры по отдельным вертикалям в варочном и выработочном бассейнах.

По сечению I-с максимальная температура приходится на вертикаль I и минимальная — на вертикаль III, обуславливая на глубине 0,25 м разность в 50°, что объясняется уходом поверхностного нагретого потока сверху вниз и поворотом его в горизонтальной плоскости к перешейку (в проток). Это иллюстрируется и расположением изотерм по данному горизонту (рис. 2). Малая температура по вертикали III, расположенной вблизи продольной оси, является следствием восхождения потока стекломассы снизу вверх для осуществления замкнутой циркуляции (термические пстоки). Отсюда и удельные падения температур будут большими по вертикалям I и II, чем по вертикали III (рис. 49). По сечению II-с имеется несколько серий наблюдений, причем средние, наиболее достоверные данные приведены на рис. 47. Естественно, что температуры по вертикали III здесь будут выше, поскольку горячий поток поворачивает к входу в проток; разница в температурах здесь составляет 20°. В выработочном бассейне, где измерены 12 вертикалей, можно сопоставить распределение температуры в симметричных частях бассейна, причем необходимо еще раз упомянуть, что запись температур производилась в то время, когда работала горелка той части ванны, в которой измерялась температура. Как видно (рис. 48), абсолютные значения температур в верхних зонах стекломассы превышали температуры варочной перед перешейком на тех же горизонтах — на 30—40°, причем эта разница уменьшалась к сечению IV, а по глубине затухала в зоне 0,5—0,7 м от поверхности.

Это обстоятельство позволяет нанести схему потока, идущего

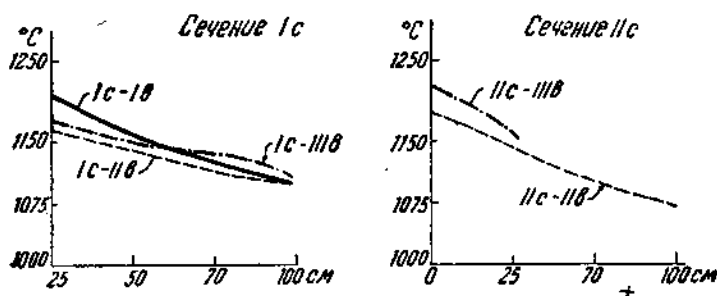


Рис. 47. Изменение температур по глубине стекломассы в варочном бассейне.

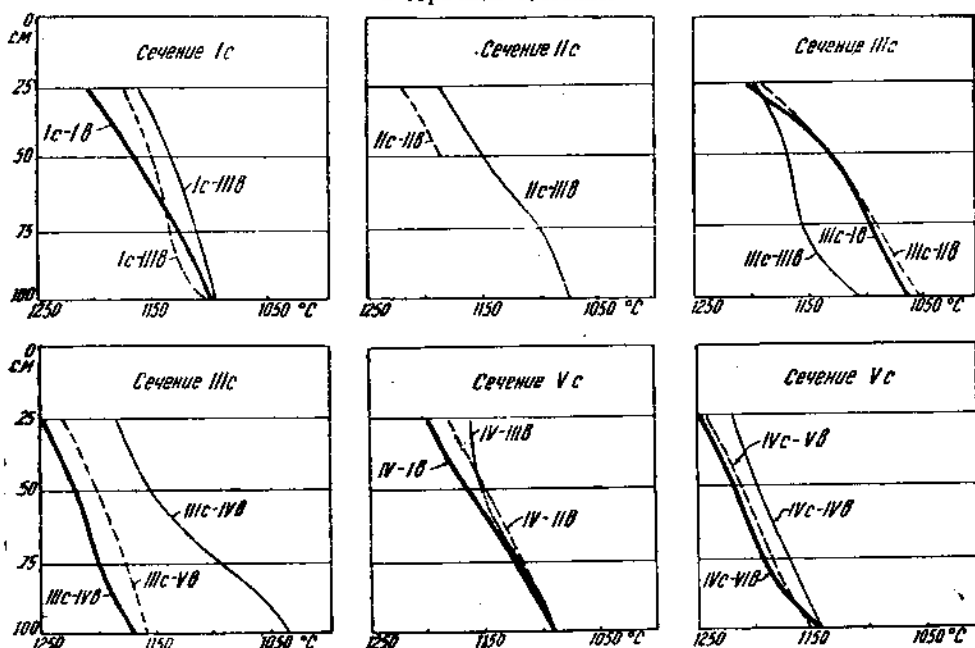


Рис. 49. Изменение температур по глубине стекломассы в выработочном бассейне.

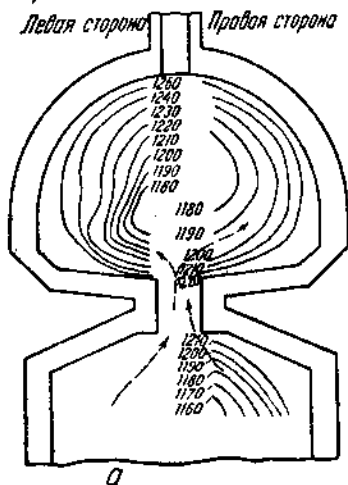
из одного бассейна в другой, выяснив при этом влияние конфигурации ванны на расположение потока.

На рис. 49 изображены изотермы по отдельным горизонтам выработочного бассейна.

Сравнительный анализ их показывает, что по мере углубления в толщу стекломассы можно установить изменения в состоянии потока, вступившего в выработочный бассейн. На верхнем горизонте 0,25 м максимумы температур приближаются к периферии, что следует отнести за счет поверхностного «производственного» потока (fabrikatorische Strömung), идущего к фидеру. Глубже температуры уравниваются, изотермы делаются реже (следовательно в вертикальных сечениях они выпрямляются

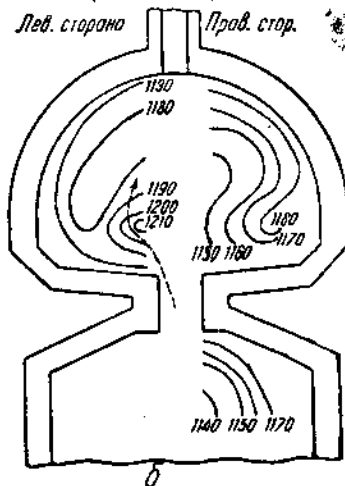
Гориз. I-I глуб. 250 мм

Левая сторона Правая сторона



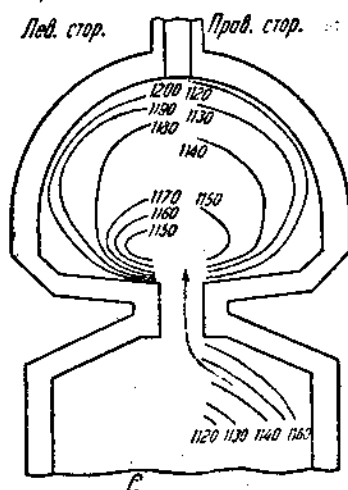
Гориз. II-II глуб. 500 мм

Лев. сторона Прав. стор.



Гориз. III-III глуб. 750 мм

Лев. стор. Прав. стор.



Гориз. IV-IV глуб. 1000 мм

Лев. стор. Прав. стор.

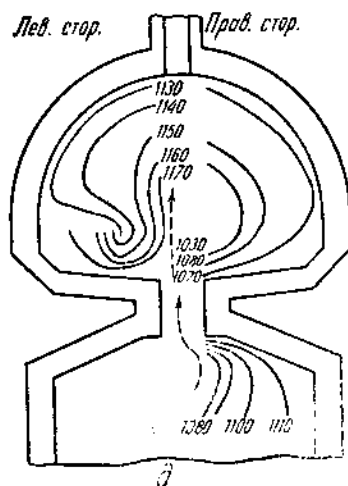


Рис. 49. Распределение температур по отдельным горизонтам.

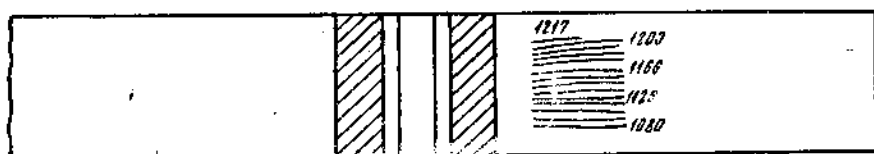
(рис. 50 и 51), а в самых придонных слоях температура убывает к периферии за счет охлаждения стен («мертвые углы»).

б) Продольное, по течению стекломассы, распределение температур легко увидеть на рис. 50 и 51.

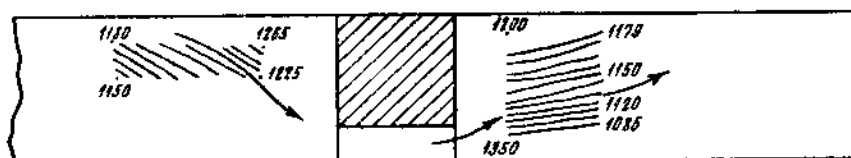
Схему потоков, идущих поперек оси печи, можно построить на основе рис. 52, представляющего распределение температур поперек печи.

В сечении I-с ясно видно влияние восстающих потоков у средней оси печи, тут температурный перепад поперек ванны го-

Сечение I в. II в.



Сечение III в. IV в.



Сечение V в. VI в.

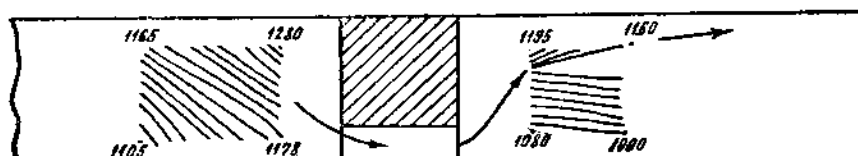
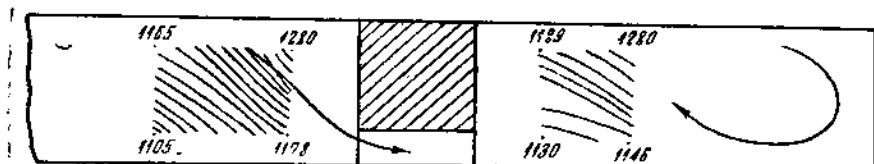
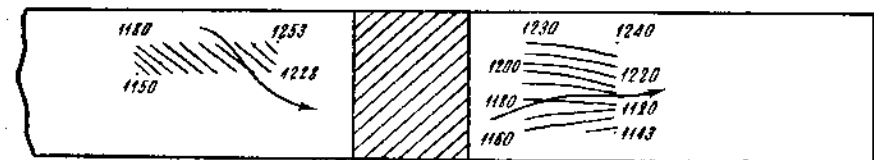


Рис. 50. Распределение температур по продольным сечениям ванны печи. Сечения I в. II в. III в.

Сечение VII в. VIII в.



Сечение IX в. X в.



Сечение XI в. XII в.

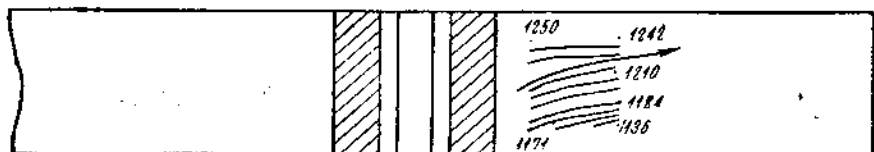


Рис. 51. Распределение температур по продольным сечениям ванны печи. Сечения IV в. V в. VI в.

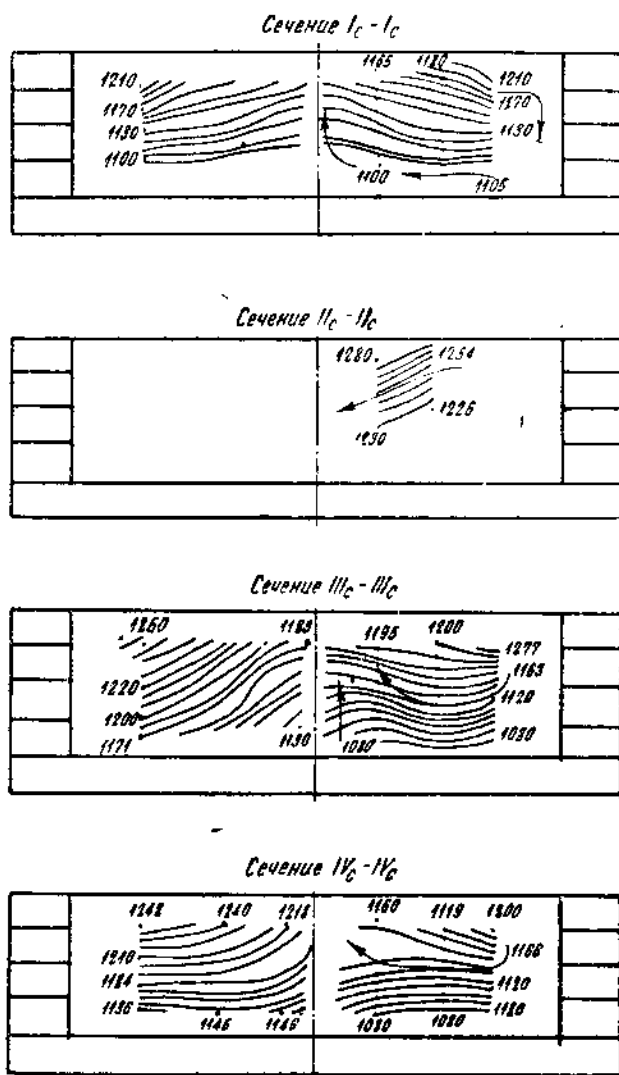


Рис. 52. Распределение температур поперек ванной печи по вертикальным сечениям: I с. II с. III с. IV с.

раздо меньше, чем по глубине. По сечению II-с заметно влияние опускающейся в проток стекломассы. В сечении III-с по оси печи поток подымается, а со стороны боковых стен, на глубине 0,5—0,6 м, идут центроострительные потоки (см. стрелку). Наконец сечение IV-с иллюстрирует значительную разницу в температурах правой и левой половины; учитывая, что измерение по обеим частям производилось не одновременно, нельзя признать возможным их сравнительный анализ.

Исходя из относительного расположения перешейка и точек

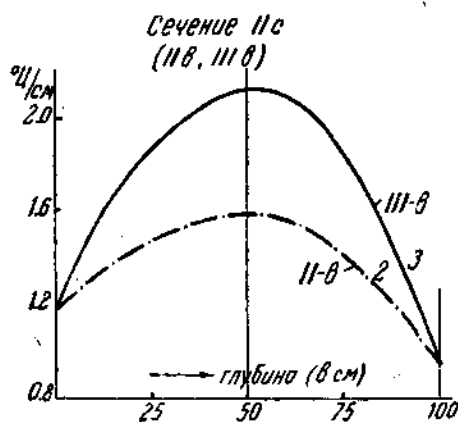
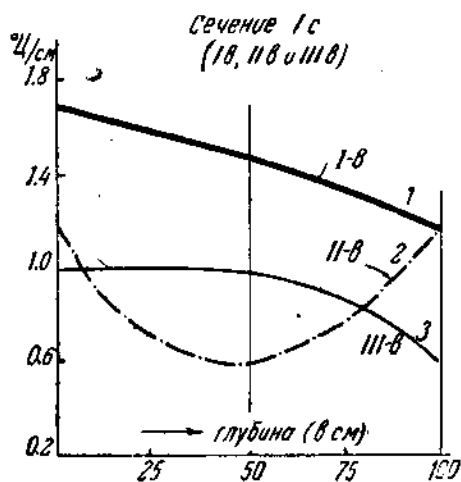


Рис. 53. Удельное падение температур по глубине в варочном и выработочном бассейне.

измерения, следует полагать, что основной поток стекломассы несколько сдвинут влево, что может носить временный характер (это увязывается с перегревом левой части выработочного бассейна) и зависит от работы фидеров. Так как в продолжение исследования работал только центральный фидер, то следовало бы ожидать вполне симметричной картины. Если однако таковая симметрия и не вполне соблюдена в данном случае, то несомненно, что выход потока из перешейка носит вполне стабильный характер, т. е. ширина потока обеспечивает его устойчивость при движении и, сообщая ему достаточную инерцию, делает его (по сохранению направления) менее чувствительным в отношении температурной игры на поверхности, а также вследствие изменения производительности (по тоннажу вырабатываемой отдельными фидерами стекломассы). Интересно отметить, что распределение изотерм (рис. 50 и 51) дает повод предположить наличие обратного потока, циркулирующего вследствие охлаждения у стен.

То обстоятельство, что при исследовании работал только один фидер и нельзя было менять направление потоков за счет включения различных и разного числа фидеров, не позволяет полностью оценить качество данной печи с точки зрения стабильности в движении стекломассы. Во всяком случае, важно отметить то, что Quellpunkt не обнаруживает блуждания и что очертания стен печи сообщают рисунку изотерм стекломассы характер концентрических, в известных случаях симметричных кривых.

в) Удельные падения температур в различных отделах бассейна представляют интерес с точки зрения выяснения схемы потоков и условий теплопередачи в самой стекломассе. На рис. 53 и 54 приведены удельные падения температуры в стекломассе варочной и выработочной части ванны, по которым можно заключить следующее:

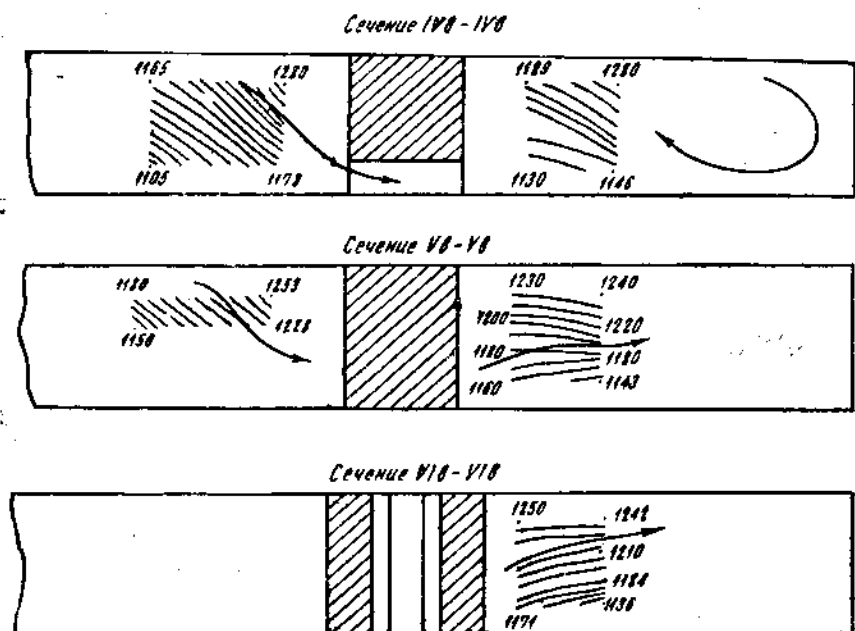


Рис. 54. Удельное падение температур по глубине в выработочном бассейне.

По сечению I-с — у стены (сечение I-в) — плавное падение, обусловленное близостью наружной стены, уменьшающееся с глубиной, поскольку охлаждающаяся стекломасса погружается вниз; наиболее резкое падение в поверхностных слоях, где горячая стекломасса приходит в соприкосновение с холодными стенками; величина падения — от $1,6^\circ$ до $1,2^\circ$ на 1 см.

По сечению II-в — наименьшее падение на средних глубинах, где имеется обратный от перешейка поток (к стене).

То же явление и по сечению III-в, но здесь возвратный поток глубже расположен вследствие близости к протоку; минимальные падения — $0,6^\circ/\text{см}$.

По сечению II-с представлена 1 вертикаль — II-с — III-в, дающая весьма резкое падение на средних глубинах, что следует приписать ошибке наблюдения (кривая 3, рис. 53). Если ее прокорректировать, то получим значительно более пологую кривую (2), поскольку эта вертикаль находится в зоне активного производственного потока; учитывая наличие мертвого слоя перешейка выше уровня протока, перелом падения температур здесь неизбежен, но не столь резкий, как это записано по прибору.

По сечению III-с, находящемуся уже в выработочном бассейне, получаем закономерный ряд кривых, иллюстрирующих влияние возвратного потока от стенки к потоку. Резкое повышение величины удельного падения по вертикалям III-с — III-в объясняется пограничной зоной между неподвижным слоем и движущимся (входящим) потоком в выработочном бассейне. Удельные падения колеблются в пределах от $2,2^\circ/\text{см}$ до $1,2^\circ/\text{см}$, причем максимумы приходятся на поверхностный слой $0,25-0,5$ м, где имеются встречные потоки (схемы на рис. 50, 51). С левой, симметричной части бассейна (сечения IV-в, V-в и VI-в) качественно имеет место то же явление, но количественно падение меньше — от $1,2^\circ/\text{см}$ до $0,4^\circ/\text{см}$ вследствие большей пассивности стекломассы: как уже отмечено, правая часть бассейна была несколько перегрета.

По сечению IV-в удельное падение температуры у ближайшей вертикали (I-в — IV-с), увеличивается с глубиной за счет наличия малотеплопроводных глубинных неподвижных слоев; эта тенденция наблюдается и у вертикалей, более близких к центру (II-в — IV-с и III-в — IV-с), у которых однако верхние горизонты характеризуются меньшим падением, особенно III-в — IV-с, пересекающая входящий производственный поток. Эта вертикаль и обозначает локализацию Quellpunkt'a. На левой стороне бассейна характер кривых иной вследствие затрудненности в измерениях на этой стороне. Здесь возможны ошибки, но все же целый ряд данных подтверждает общую схему потоков, наличие возвратного от стен потока в срединных слоях, что обуславливает пониженное падение ($0,8^\circ/\text{см}$). Кроме того асимметричность в кривых объясняется и несопадением в интенсивности нагрева газовой среды, как об этом уже указано.

Резюмируя анализ данных по удельным падениям, следует заключить, что общий характер их дает право с достаточной достоверностью нанести схему основных потоков, характеризующих технологическую и теплотехническую обстановку процесса варки в самом стекле. Сопоставляя эти данные с результатами работы Гельгофа, следует констатировать совпадение схемы потоков в той ее части, которая является общей, потому что ванна, изученная Гельгофом, значительно отличалась по своей характеристике от ванны ГЭИС.

V. Выводы по исследованию

На основе проведенной работы, сопоставления и анализа данных можно сделать следующие выводы:

A. По работе горелок

Регенеративная работа обеих горелок является одинаковой; коэффициент полезного действия их следует признать достаточно высоким, что оправдывает конструкцию с точки зрения кладки

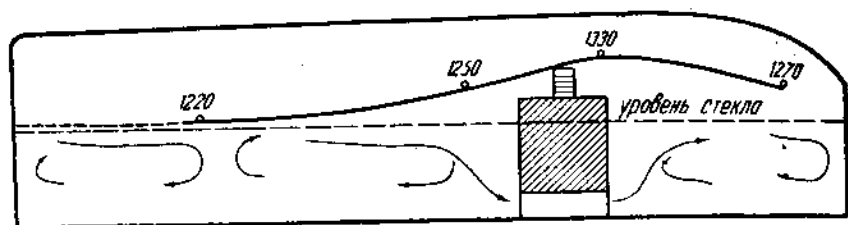


Рис. 55. Температурная кривая газовой зоны вдоль печи (по средним данным за оба полупериода).

стен и изоляции. Поскольку засосы воздуха по пути следования дыма оказываются минимальными, следует считать систему кладки их рациональной. Так как потеря на сопротивление при проходе газов очень невелика, то следовательно ее конструкция является теплотехнически оправданной. При этом интересно сделать заключение о рациональных методах измерения температур в горелках: на основе сравнительного анализа можно признать достаточно правильным измерение оптическими приборами внутренней поверхности стен горелок, прибавляя к полученным показаниям $20-25^\circ$; при этом наружная температура стены должна быть не выше 100° . Если же измерять термонарой, то ни в коем случае ее нельзя подвергать действию лучистой теплоты печных газов; из показаний ее по воздуху следует вычесть $40-50^\circ$, а по дыму — увеличить на $20-25^\circ$.

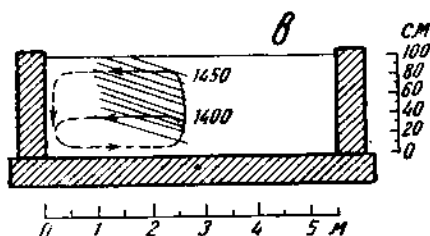
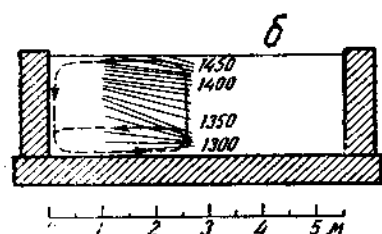
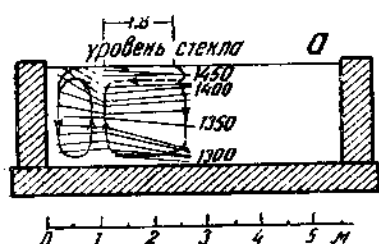
Б. По тепловому режиму газовой среды

Поскольку данная печь отапливалась нефтяными форсунками, по существу определяющими форму, длину и теплотехнический характер факела, заключения по состоянию газовой среды будут относиться к методу отопления и способу ведения режима в печи.

а) При поставленных форсунках системы Котляренко полное развитие факела, полное сгорание наступает уже после поворота факела к вылету. Наличие экрана, улучшая перемешивание, обуславливает максимум CO_2 в средних и нижних горизонтах факела. Вместе с тем эффект центробежной силы при повороте и удар газов об экран вызывает местное повышение давления в центре (чисто скоростного характера) до больших размеров ($15-19$ мм H_2O). Вместе с тем экран заметно выравнивает и разрежает изотермы в выработочной части, стабилизируя температурное распределение и делая его независимым от направления газов.

В варочной же части, как правило, рисунки изотерм в своих полупериодах являются зеркально-симметричными.

б) Охарактеризовать исчерпывающе конструкцию данной печи с точки зрения влияния ее на газовый режим — по настоящей работе — не представляется возможным, поскольку, как указано, главным фактором являются форсунка и ее режим. Во всяком



Распределение температур поперек ванны:

- а) между I и II горелкой
- б) „ II и III „
- в) „ III и IV „

Рис. 56. Поперечное распределение температур по Гельгофу.

случае можно указать, что конструкция позволяет в известных пределах варьировать режимом и не будет стеснять его в пределах тех тепловых нагрузок ($\text{кал/м}^2/\text{ч}$), на которые данная печь рассчитана.

в) Медленное развитие факела горения отчасти зависит и от того, что ось форсунки образует слишком острый угол с зеркалом стекломассы; при этом энергичное перемешивание газов относится к месту поворота факела и удара об экран. Следует полагать целесообразным при данной конструкции печи и расходе нефти увеличить угол наклона форсунки, отрегулировав последний по данным комбинированного контроля — температур и состава газов.

г) Тепловая нагрузка за время исследования составляла $30000 \text{ кал/м}^2/\text{ч}$ при расходе нефти 190 кг/ч и производительности печи в 6 т/сутки . Иными словами, производительность 1 м^2 варочного бассейна составляла всего $0,25 \text{ т}$ сутки. Такая нагрузка определяет низкие температуры газовой среды и пониженные температуры стекломассы (см. работу Гельгофа). Нормальной нагрузкой для данной печи следует считать $12\text{—}15 \text{ т}$ сутки. При интенсификации режима фокус горения следует перенести ближе к сыпке, так чтобы максимальная температура приходилась на расстоянии $0,8\text{—}1,1 \text{ м}$ от перешейка. На рис. 58 приведена температурная кривая вдоль печи (по средним данным). Имея в виду методу измерения, на эту кривую следует смотреть как на относительную; абсолютные значения будут выше на $60\text{—}80^\circ$.

В. По тепловому режиму стекломассы

а) Данные поверхностного пирометража показывают, что в области выработочного бассейна состояние газовой среды (температура последней) оказывает весьма заметное влияние на слой

Продольное сечение; распределение температур вдоль бассейна

а) по средней оси

б) на 1/3 ширины

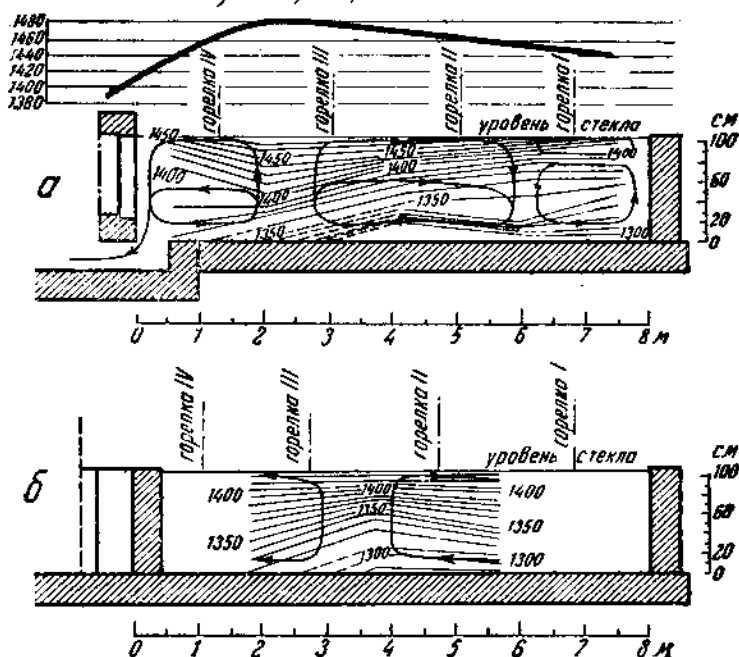


Рис. 57. Продольное распределение температур по Гельгофу.

стекломассы до 10—15 см глубины. В пределах этой глубины падения температуры на 1 см заключаются в пределах до $2^{\circ}/\text{см}$.

Место Quellpunkt'a уже определенно обозначается на указанной глубине — 10—15 см — и по своему положению оказывается достаточно устойчивым, что связано с правильным пропорционированием соответствующих размеров частей бассейна (сечение перешейка).

б) Глубинный пирометраж определенно связывает направление потоков в самой стекломассе с конфигурацией бассейна. Из сопоставления ряда изотерм по различным сечениям можно установить пути основных потоков, переходящих из варочного бассейна в выработочный. Из плавного характера указанных кривых следует сделать вывод об устойчивости направлений этих потоков, однородность которых определяет рациональный режим механизированного непрерывного производства. То обстоятельство, что довольно мощный и горячий поток, идущий к фидеру, возвращается в средних горизонтах обратно (к перешейку), даст некоторые указания на проектировку сечения входного отверстия фидера и на конструкцию круговой стены выработочного бассейна;

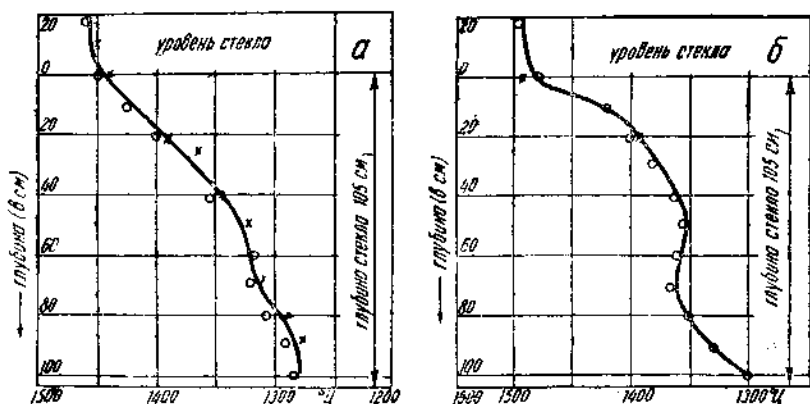


Рис. 58. Распределение температур по глубине по Гельгофу.

лучше, если она будет изолирована: это поможет стабилизации пути потоков.

С этой точки зрения и изоляция свода выработочной части явится положительным фактором, выправив кривые изотермы, и тем самым уменьшив продольный перепад температур по пути производственного потока стекломассы.

Удельные падения температур показывают, что интенсивная теплопередача в стекломассе ограничивается 0,50—0,63 м, что может дать основание к суждению о сокращении глубины выработочного бассейна. Вместе с тем изменения величин удельного падения температур дают определенные основания к начертанию схем потоков, направление которых удовлетворяет общим теплотехническим и технологическим требованиям, предъявляемым к ваннам рассматриваемой конструкции.

в) При сопоставлении составленной схемы потоков со схемой, данной Гельгофом в его статье «Потоки и распределение температур в стекловаренных печах»¹, обнаруживается определенная разница, связанная, очевидно, и с общей конфигурацией бассейна, его величиной и методом отопления. Во-первых, абсолютные значения температур значительно выше, что следует объяснить гораздо более напряженным режимом (производительность 0,5 т/м²/сутки), на что указывает и значительно более высокая температура газовой среды. Во-вторых, распределение температур и потоков вдоль ванны вследствие большой длины ванны (8 м против 6 м) и пониженного положения протока количественно иное. Однако следует отметить и много аналогичного: максимум температур сдвинут к перешейку, потоки разбиты на отдельные циклы и др. Вместе с тем ряд сравнительных анализов температурных измерений, произведенных теплотехнической лабораторией Института

¹ „Glastechnische Berichte“, № 1 от 1931 г.

„Strömungen und Temperaturen in glaswannen“, Gelhoff, Schneklöth und Thomas.

стекла, дает основание предполагать, что полученные Гельгофом температуры в стекломассе (рис. 57 и 58) являются несколько преувеличенными.

г) На основании полученных температурных данных является возможным определение коэффициента прямой отдачи факела, что представляет определенный практический интерес при теплотехнических расчетах ваин с аналогичным методом отопления. Согласно литературным данным этот коэффициент теоретически пока неопределим и может быть получен на основании эмпирических данных¹. Определив теоретическую температуру горения нефти с подогретым до 850° воздухом (при $\alpha = 1,23$) и учтя наружные температуры стен, свода и пода до обширному опытному материалу², с использованием наиболее достоверных формул по потере нагретыми поверхностями, оказалось возможным составить тепловой баланс варочного бассейна, который по встречному расчету сошелся с точностью около 0,5%, что подтверждает надежность принятых температурных значений. Считая температуру пламени газов, согласно полученным данным, в 1400—1450°, получаем коэффициент прямой отдачи — 0,40. Эту величину можно считать точной до $\pm 5\%$, поскольку показания термопары в варочном бассейне могут дать отклонения от истинных температур в размере 50—80°. Таким образом этот коэффициент является достаточно точным для практического использования при расчетах, поскольку нет оснований ожидать большого расхождения между измеренными и истинными температурами газового пространства стекловаренной печи.

¹ Такой коэффициент дается для ряда топочных установок и для вращающейся цементнообжигательной печи.

² Исследования температур свода и пода стекловаренной печи на заводе им. Калинина (работа М. Г. Степаненко и Гнуздева, 1929).

М. Г. Степаненко
И. О. Томашевич

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВАННОЙ ПЕЧИ И КАНАЛА ФУРКО ЗЕРКАЛЬНОГО ЗАВОДА¹

1. Введение

В мае — июле 1933 г. бригадой теплотехнической лаборатории Института стекла были обследованы ванная печь и канал Фурко Константиновского зеркального завода, предназначенные для производства зеркального стекла толщиной до 8 мм по методу Фурко. Установка работала с ноября 1931 г. Топливом являлся каменный уголь, газифицируемый на газогенераторах системы Керпелли. В составе топлива наблюдались большие колебания, что можно иллюстрировать следующими цифрами (в процентах):

За май 1933 г.

Содержание влаги	от 3,75 до 10,3
" золы	5,30 " 26,0
" кокса	42 " 61
Летучие	25 " 37

Ясно, что такие сильные изменения в составе топлива при отсутствии контроля за работой газогенераторов вели к непостоянству режима в самой ванной печи.

Шихта ванной печи имела следующий состав для одного за-
веса (в процентах по весу):

Песок	140 кг — 59,4
Сода	33,6 " — 16,4
Мел	37,3 " — 15,8
Вулканич. пепел	16,3 " — 6,9
Сульфат	3,5 " — 1,5

Средние составы стекла.

За февраль 1933 г.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
71,78	1,18	0,38	10,19	0,09	0,63	15,73

За март 1933 г.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
71,78	1,16	0,42	10,17	0,08	0,71	15,18

¹ Изучение проведено бригадой ГЭИС в составе: инж. И. О. Томашевич, В. Шахурина, М. В. Болтунова и А. К. Руппуль.

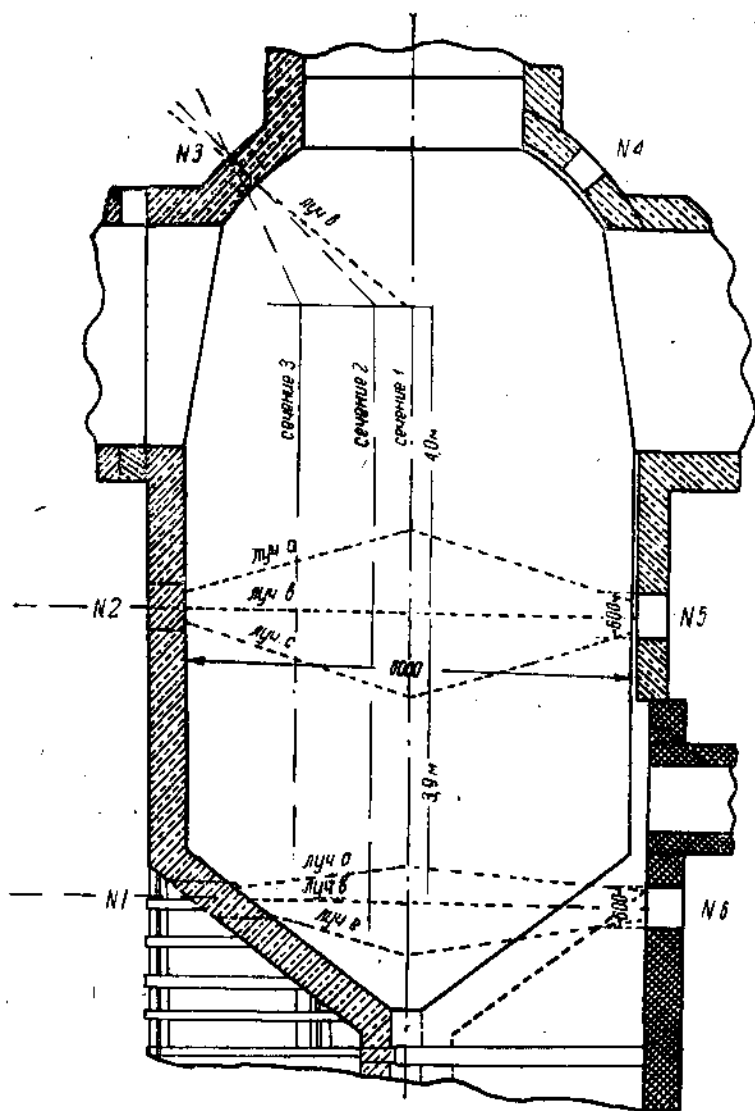


Рис. 1. План рафинажного бассейна с обозначением мест и линий изменения (сечения 1, 2 и 3 являются продольными).

Самая ванная печь представляет собой два бассейна — варочный и выработочный, разделенные друг от друга протоком шириной 400 мм, длиной 1200 мм и высотой 300 мм. Площадь зеркала варочного бассейна — 80,1 м², площадь зеркала выработочного бассейна — 59 м². Установка имеет четыре машины Фурко, расположенные крестообразно, из которых три тянут зеркальное стекло с шириной ленты 2,4 м, а четвертая — оконное стекло обычных размеров — 1,35 м.

Печи с протоком типа «Симплекс» встречаются до сих пор лишь в производстве бутылочного сортового стекла и электроколб. Печь с протоком, обслуживающая машины Фурко, является первым опытом такого рода, и поэтому изучение данной системы представляло большой интерес с точки зрения пригодности печи с протоком для производства широкого листового стекла.

За истекшее со дня пуска печи время основными пороками, наблюдавшимися при работе системы, являлись так называемые «глазки» и «разнотолщинность» ленты по ширине.

«Глазки» наблюдались все время на всех четырех машинах; «разнотолщинность» — явление более периодическое. К сожалению, записи в заводских журналах не отражают зависимости появления «разнотолщинности» от других факторов.

«Глазки» представляют собой очень мелкие включения внутри ленты стекла серовато-белого цвета.

По произведенным заводской лабораторией анализам, состав их почти не отличается от основной массы; замечается лишь повышенное содержание алюминия.

Иногда незаметные при отрезке стекла «глазки» явно становятся видимыми в процессе шлифовки, и таким образом почти готовая продукция идет в брак или бой.

Исходя из этого, исследовательская работа должна была разрешить вопрос о причинах появления «глазков», о причинах «разнотолщинности» ленты и кроме этого изучить конструктивные достоинства и недостатки данной печной установки.

В процессе работы Институт несколько расширил тему, включив в нее обследование регенераторов ванной печи и шахты Фурко. Таким образом объектами теплотехнического обследования были:

- 1) работа регенераторов;
- 2) распределение температур в газовой зоне и стекломассе рафинажного и варочного бассейнов и канала Фурко;
- 3) работа подогревательной и подмашинной камеры;
- 4) работа шахты Фурко.

Имея в виду длительность отдельных этапов работы и невозможность одновременного их проведения, необходимо было на весь период исследования стабилизировать режим ванны, что и было осуществлено.

Средние данные контрольных измерений дают следующую характеристику работы генераторной установки.

Средний состав генераторного газа (сухого) в процентах:

CO_2 . . .	3,5—9,5
CO . . .	18—19
O_2 . . .	0,2—0,4
H_2 . . .	12,0—13
CH_4 . . .	3,3
N_2 . . .	55—60

Теплотворная способность газа — в пределах 1 150—1 250 кал. Температура дымовых газов — 360—426°. Давление в газовом коллекторе — 20—30 мм. Тяга дымовой трубы — 28—35 мм.

Температурный режим самой печи был таков: температура печного пространства:

За первой горелкой	1400—1420°
За пятой горелкой	1120—1140°
На закружении	1090—1110°
Под сводом рафинажного бассейна .	1200—1220°

Среднее суточное количество засыпаемого состава — 48 т.

Средний съем стекла — 37—40 т в сутки.

Контрольные точки, по генераторному газу находились в общем коллекторе перед клапаном Моргана, по дымовым газам — в борове трубы за клапаном.

Температуры ванной печи измерялись оптическим пирометром «Pyropto» и платино-платинородиевыми термопарами.

II. План, программа и методы исследования

Как уже сказано выше, основная цель теплотехнического обследования заключалась в том, чтобы разрешить вопрос о пригодности ванной печи с узким перешейком для выработки листового стекла по способу Фурко и внести по возможности коррективы в эту конструкцию.

К разрешению этого вопроса и вместе с ним вопроса о разнотолщинности ленты можно подойти с точки зрения необходимости для бесперебойной, нормальной работы машин Фурко иметь определенную, стабильную вязкость стекломассы, определяемую температурой поступающей в лодочку стекломассы. Если вся стекломасса, идущая под лодочку из различных слоев по ширине канала, будет иметь одинаковую и постоянную в течение больших отрезков времени температуру, то режим машины Фурко можно легко стабилизировать и добиться хорошей работы ее.

Таким образом возникает вопрос: может ли данная конструкция печи обеспечить необходимое для работы машин постоянство температуры поступающей в лодочку стекломассы. Исходя из этого, в самой ванной печи и в канале Фурко как по глубине, так и по ширине их было предпринято изучение по методу пространственной сетки, вполне оправдавшему себя в предыдущей работе теплотехнической лаборатории ГЭИС на заводе им. Уханова.

Для поверхностных измерений температуры был применен специально сконструированный прибор В. Э. Бромлеем прибор «щуп», впервые опробованный при данной работе (рис. 2). Для измерения температуры в глубине стекломассы применялся глубинный прибор того же автора, уже опробованный при вышеупомянутой работе Ин-та стекла на заводе им. Уханова в Москве.

Так как глубинный прибор и работа с ним уже достаточно хорошо охарактеризованы, то здесь уместно описать только впервые примененный на практике прибор для поверхностного пиromетража.

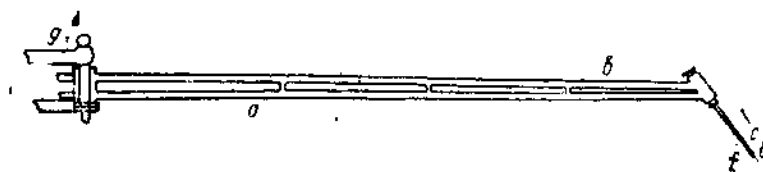


Рис. 2. Поверхностный пирометр сист. проф. Бромлея.

Изображенный на чертеже прибор для поверхностного пирометража стекломассы представляет собой систему концентрических стальных труб *а*, с помощью которых осуществляется водяное охлаждение прибора, гарантирующее постоянство температуры холодного спая и защищающее пирометр от действия высоких температур.

Внутри этих труб проходит электрический провод от термоэлемента. Конец прибора *б*, входящий в печь, несет на себе наконечник *с*, хромоникелевой стали, в котором закрепляется термopара *т* в защитной фарфоровой трубке *г*. Горячий спай термopары не защищен с тем, чтобы уменьшить ошибку измерения (за счет тепловой инерции). Наконечник *с* присоединяется к прибору при помощи шурупа, проходящего через тело прибора и зажимающего расширенную часть наконечника.

Наружный конец прибора имеет винтовую нарезку, с помощью которой привинчивается рама *г*, являющаяся противовесом в случае глубокого, свыше 3 м, ввода прибора в печь и облегчающая манипулирование с ним при установке его на определенную координату. Снаружи аппарат покрывается слоем изоляции толщиной приблизительно в 0,7—0,8 см. Изолирующий состав готовится из асбестита и жидкого стекла с водой; изоляция сверху еще армировалась для прочности железной проволокой, закрепляемой предварительно вокруг тела прибора.

Обмазка производилась часов за 10 до начала пирометража, и прибор ставился на сушку. После высыхания в течение нескольких часов вода испарялась и изоляция держалась очень прочно, хорошо защищая от жара стенки прибора.

После нескольких часов работы прибор осматривался и вновь изолировался в тех местах, где изоляция пострадала.

Для установки аппарата в рабочее положение имеется особая рама (рис. 3), укрепляемая перед окном, через которое производятся пирометрические наблюдения.

Рама состоит из неподвижных вертикальных направляющих *г*, по которым скользит поперечина *д* с роликом *з*. При помощи ролика прибор может легко вдвигаться в печь и выдвигаться из нее; подъем и опускание прибора производятся системой блока и рычага, перемещающих поперечину в вертикальном направлении.

При начале работы «шуп» передней частью устанавливается на ролике, а наружная часть прибора, оканчивающаяся рамой, противовесом ставится на какое-либо приспособление в виде стойки с отверстиями на различной высоте, благодаря чему можно под-

держивать прибор в строго горизонтальном положении для точной координации точки измерения внутри печи.

После такой установки в прибор пускается вода под давлением 2—2,5 ат, затем прибор вводится в печь и фиксируется там в нужной точке.

Как только показание гальванометра устанавливается, что происходит через 30—40 сек., его записывают, а прибор передвигают в следующую точку. Если перемещение происходит по глубине ванны, то прибор непосредственно из первоначального положения опускается ниже; если же перемещение производится по ширине ванны, то прибор поднимается из стекломассы настолько, чтобы спай термопары был немного выше уровня стекломассы, а затем уже передвигается прибор по ролику вперед или назад.

Все измерения производятся сначала по юдной прямой, потом меняют положение прибора и производят измерения по другой прямой.

Измерения по трем прямым, называемым далее лучами, т. е. по 35—40 точкам, требуют около двух часов работы прибора в печи. Установка прибора на определенную координату занимает около двух мин., само измерение — примерно $1\frac{1}{2}$ мин., остальное время идет на введение и выведение прибора из печи.

Нужно отметить следующие важные моменты, выяснившиеся в процессе работы:

1. Самым трудным является введение прибора в печь, так как размеры окон не позволяют прямо вкатить его, приходится опускать нижнюю часть прибора и высоко поднимать верхнюю, причем легко сломать термопару.

Благодаря этому пришлось в процессе работы значительно уменьшить длину наконечника с.

2. Вторая трудность работы заключалась в том, что стекломасса, попадая в отверстия фарфорового капилляра, через который выходила термопара, очень быстро портила термопары, так как, застывая, не давала возможности извлечь платину, не порвав ее. Таким образом термопара после измерения нескольких точек выходила из строя и заменялась новой.

Кроме того, стекломасса проникала и в наконечник, в котором закреплялась фарфоровая трубочка, застывала там и не давала

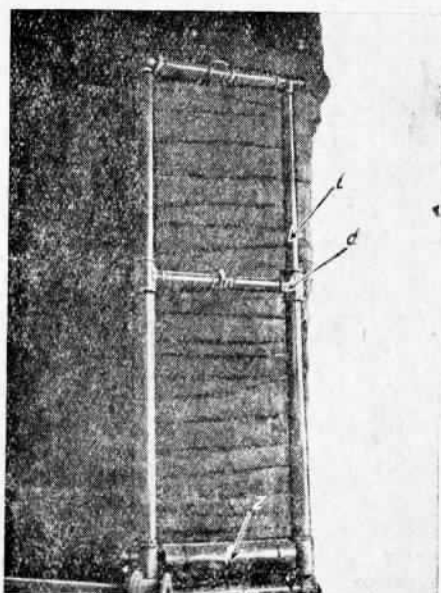


Рис. 3. Рама для установки пирометра сист. Бромлея.

возможности вытащить для смены термопары трубки. Приходилось выбивать фарфор из наконечника.

Благодаря этим обстоятельствам расход платины и фарфора был очень велик, во избежание чего, а также и для ускорения работы пришлось плотно заделывать асбестовым волокном отверстия между наконечником и фарфоровой трубкой, так чтобы стекломасса не могла в них проникнуть. После этого процесс работы ускорился примерно в три раза.

Нужно отметить еще, что крайне важно очень тщательно изолировать место соединения платины с электрическим шнуром, проходящим через тело прибора, так как случается, что благодаря плохой изоляции получается термоэлемент с металлом прибора, развивающий огромную для применявшегося гальванометра электродвижущую силу (до 40 мв); в результате чего получают не только неверные показания, но может быть испорчен гальванометр.

После того как в процессе работы все эти обстоятельства были выяснены и учтены, прибор работал безукоризненно, давая настолько закономерные, как это видно из дальнейшего, показания, что сомневаться в их правильности не было основания.

Соответственно главной задаче — изучению распределения температур в газовой зоне и стекломассе ванной печи и канала Фурко — был составлен следующий план работы:

А. Распределение температур в стекломассе рафинажного бассейна

Измерения производились по трем поперечным сечениям: за протоком, за 5-й парой горелок и на закруглении, там, где основной поток стекломассы расходится по каналам. Количество точек в сечениях то же, что и в варочном бассейне, т. е. $5 \times 5 = 25$.

В указанных плоскостях измерялись температуры на трех разных глубинах. В рафинажной части предположено было вместе с тем провести еще и поверхностный пирометраж на глубине 1—2 см от уровня стекломассы. Целью его являлось определить местонахождение «Quellpunkt'a», т. е. источника потоков, и изучить его поведение.

Поверхностный пирометраж должен был проводиться через окна № 1, 2, 5, 6 (см. план).

Учитывая конструкцию прибора и размеры самих окон, измерения можно произвести только на вполне определенной площади, представляющей собой сектор круга с центром в точке подвеса прибора на раме, с радиусом, меняющимся в зависимости от расстояния, на которое прибор введен в печь.

Таким образом из каждого окна было промерено по несколько «лучей», на которых точки измерения находились через 250 мм друг от друга (рис. 1).

Б. Глубинный пирометраж канала Фурко

Глубинный пирометраж каналов предполагалось провести в кюльдесах и подогревательных камерах по трем вертикальным

сечениям: одно — в центре и два — на расстоянии 0,5 м от стен, и в пяти горизонтальных плоскостях на расстоянии 10 см от поверхности и 15 см друг от друга.

Измерения производились при двух температурных режимах ванной печи, отличающихся на 30—60°, т. е. при 1180 и 1240°. Горячий слой термопары, который не был защищен от действия газов во время пребывания его в газовой зоне, старались при работе как можно быстрее погружать в стекломассу во избежание науглероживания платины. Кроме того, состояние горячих спаев проверялось контрольной калибровкой, менялись сами термопары, так что ошибка измерений не могла быть значительной.

В остальных этапах обследования применялись обычные методы теплотехнического контроля, как в отношении пирометрии и газового анализа, так и гидродинамики газовых потоков.

В. Работа регенераторов

Вследствие неудовлетворительного состояния насадок регенераторов не имело смысла детально их исследовать. Но поскольку завод был заинтересован в точном выяснении характера и причин ненормальной работы регенераторов, то в данное исследование внесено некоторое ориентировочное изучение насадок, проводившееся обычными методами, включавшими в себя измерение температур, тяги и состава газов.

Для проверки симметричности работы регенераторов были установлены вверху и внизу каждого регенератора термопары и газонаборные трубки, одновременно служившие и для измерения тяги.

Температура дымовых и генераторного газов и воздуха измерялась через 3 мин. Анализ газа и измерение тяги производились через 10—15 мин.

В результате выяснилось, что, температурный режим регенераторов почти одинаков в верхних зонах газовых регенераторов. В верхних же зонах воздушных регенераторов имеет место перегрев левой камеры примерно на 50—100°.

В нижних же зонах газовый регенератор левой стороны дает почти прямую линию, что указывает на крайнюю неактивность работы насадки. Правый же газовый регенератор в этой части несколько более активен.

Нижние зоны воздушных регенераторов дают картину, обратную верхним, т. е. здесь значительно выше температуры в правом регенераторе (в среднем на 50%), тогда как в верхних зонах перегрет левый регенератор.

Примечание 1. Поскольку температурные измерения в насадке производились термопарами, что обуславливает погрешность относительно истинных температур, приведенные кривые представляют интерес лишь с точки зрения сравнительной работы левой и правой камер.

Примечание 2. На диаграммах даны кривые температур за 2 полупериода; значения выведены как средние из ряда систематических наблюдений.

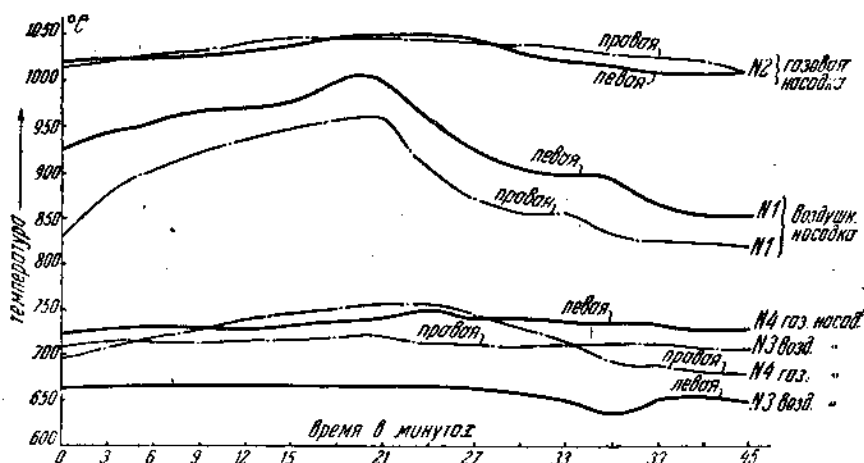


Рис. 4. Изменение температур в регенераторах (проверка работы регенераторов на симметрию).

Рассматривая в совокупности рис. 4, 5, 6, 7 и 8, следует прийти к следующим выводам.

Газовый регенератор как в верхних, так и в нижних зонах (рис. 7) совершенно не отражает периода нагревания и охлаждения, т. е. реверсивная работа его крайне незначительна. Отходящие газы покидают регенератор с очень высокой температурой — 700—750°. Эта температура не является истинной, так как в показаниях термопары не вносилось поправки. Из кривых видно, что средняя часть насадки реверсирует очень слабо (рис. 5), особенно в части под 1-й горелкой (см. кривую точки № 2).

Часть насадки под первой горелкой сильно перегрета по отношению к части под 4-й горелкой. Это видно из того, что температуру в точке № 7 (рис. 6) одинакова, а иногда даже ниже, чем температура в точках № 4, 5, 6, лежащих в нижнем ряду насадки, тогда как точки № 1 и 2 имеют температуры выше точки № 7, на 200—250°. Отсюда неизбежен вывод, что примерно $\frac{2}{3}$ объема насадки газового регенератора совершенно не используются.

В воздушном регенераторе насадка работает несколько более активно; кривые на рис. 4 дают очень растянутую температурную «пилу». Часть насадки под первыми горелками так же сильно перегрета, как и в газовом регенераторе. Здесь разница температур между 1 и 3 точками от 200 до 300°.

Средние зоны насадки (точки 3 и 4) почти совершенно не реверсируют, так же как и точка 3.

Таким образом движение газа в насадке происходит по пути, изображенному на рис. 8.

Из приведенного материала видно, что коэффициент полезного действия регенератора очень мал: остается неиспользованной реверсивная способность приблизительно $\frac{1}{3}$ объема обеих камер.

Исходя из того, что регенераторы сохраняют при нормальной

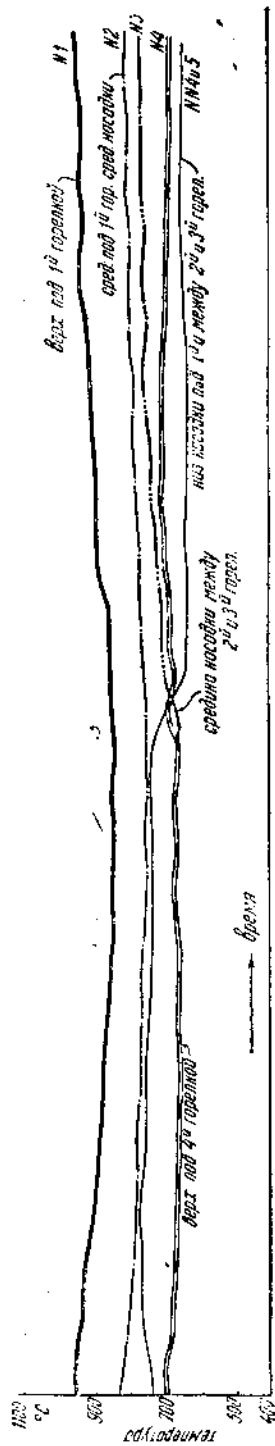


Рис. 5. Работа газового регенератора.

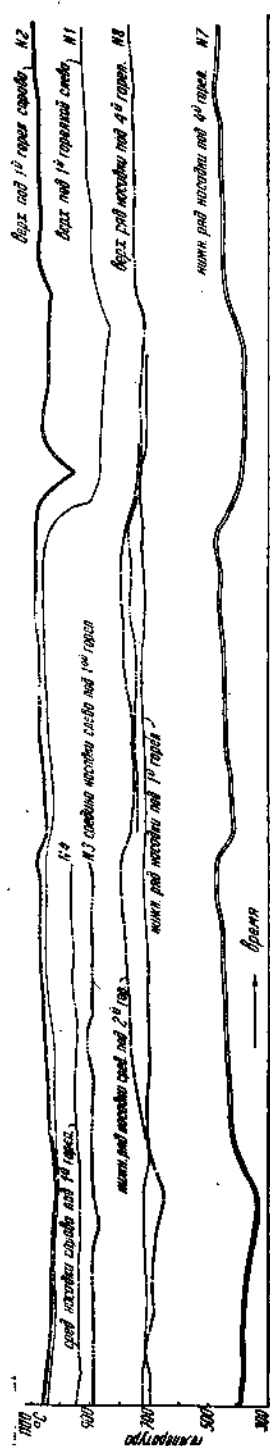


Рис. 6. Работа воздушного регенератора.

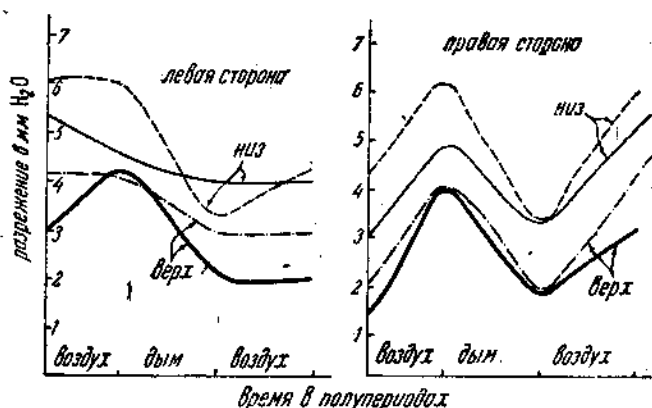


Рис. 7. Изменение величины разрежения в регенераторах.

работе в среднем 10—12% тепла, можно считать, что в настоящий момент, коэффициент их полезного действия ниже на 4%. При среднем суточном расходе топлива в 44,6 т непроизводительная затрата составляет 1,8 т угля.

По данным газового анализа проб, взятых в точках внизу и вверху регенераторов, можно предполагать, что в результате больших местных перегревов наблюдается горение газа в самом регенераторе, например, в период газ — воздух состав газа внизу регенератора (средний из нескольких анализов) 10—10,3% CO_2 и 2,3—2,8% O_2 . По мере поднятия вверх состав газа изменяется следующим образом: CO_2 —12—12,3% и O_2 —2,5%, что указывает на наличие реакции: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Но изменение состава газа влечет за собой уменьшение теплотворной способности газа на 2%, что эквивалентно расходу топлива — 1,1 т в сутки.

Г. Пирометраж подмашинной камеры и шахты Фурко

Пирометраж осуществлялся лишь в отношении одной машины № 2, как наиболее спокойно и систематически работающей.

В подмашинной камере измерялась температура газовой среды и ленты, а в шахте — температура окружающего ленту воздуха и самой ленты при помощи впаянной в луковицу термпары, т. е. с целью выяснить влияние температурного режима цеха, определялись температуры наружного воздуха на известных расстояниях от шахты.

Подобная работа была сделана в 1928 г. проф. Бромлеем на Константиновском заводе Фурко бельгийской системы, и поэтому было бы интересно сравнить этот фактор, обуславливаемый как общей конфигурацией цеха, так и расположением машин.

III. Результаты исследования

На основе принятого плана проведенная работа дала следующие результаты.

А. Распределение температур в стекломассе рафинажного бассейна

а) По длине рафинажного бассейна. По длине бассейна имелась возможность производить пирометраж по трем поперечным сечениям, по трем горизонталям и 16—20 вертикалям в каждом сечении.

Первое сечение *I* совпадает с центрами окон № 1 и 6.

Второе сечение *II* — по окнам № 2 и 5.

Третье сечение *III* — центр окна № 3 (рис. 1).

Рассматривая изотермы, полученные в результате пирометража «поверхностным» прибором — «щупом» проф. Бромлея, видно, что на различных глубинах перепады температур отличаются друг от друга (рис. 9, 10, 11 и 12).

В верхнем слое на глубине 2 см от поверхности стекла падение температуры между вертикальными плоскостями *I* и *II* в продольных сечениях 1, 2, 3 равно соответственно 50, 59 и 53°, т. е. в среднем падение температуры между сечениями *I* и *II* на длине 3,9 м равно 54°.

Таким образом удельное падение температуры в поверхностном слое составляет около 14° на 1 м длины печи.

Это падение относительно равномерно для части бассейна, заключенной между *I* и *II* сечениями. Другая картина наблюдается между сечениями *II* и *III*.

Здесь в продольном сечении 1 совпадающем с осью печи, температура по мере приближения к каналу начинает вновь возрастать и через 4 метра поднимается на 25°, т. е. повышение температуры на 1 м длины печи равно 6°. В продольном сечении 2, на расстоянии 0,5 м от центра рост температуры от *II* до *III* очень незначителен и равен 2° на 4 м, или 0,5° на 1 м длины печи. В продольном сечении 3, на расстоянии 1,5 м от центра наблюдается уже не повышение, а дальнейшее равномерное понижение температуры от 2 к 3, причем оно равно 3,5° на 1 м длины печи.

Все вышесказанное относится к верхнему горизонту, лежащему на глубине 2 см от уровня стекла.

В следующих горизонтах на глубине 20 и 50 см наблюдаются гораздо меньшие температурные перепады, чем на поверхности.

В продольном сечении 1, там, где на поверхности удельное падение составляет 14°/см, на глубине 20 см падение температуры равно 20° на 3,9 м, или 5,1°/см. В продольном сечении 2 разность температур между *I* и *II* сечениями на глубине 20 см равно 30° на 3,9 м, т. е. 7,7°/м.

На глубине 50 см падение температуры равно 10° на 3,9 м, или 2,6°/м, тогда как в поверхностном слое оно составляет 13,3°/м длины печи. В продольном сечении 3 падение температур между

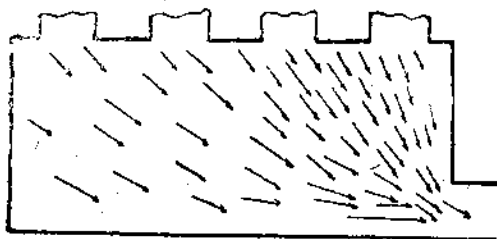


Рис. 8. Движение газа из регенератора.



Рис. 9. Продольное сечение 1.

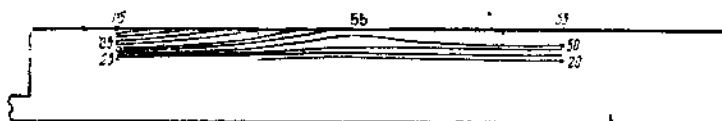


Рис. 10. Продольное сечение 2.

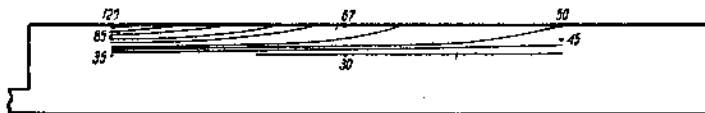


Рис. 11. Продольное сечение 3.

I и II сечениями на глубине 20 см равно 25° на 3,9 м, или $6,4^\circ/\text{м}$; на глубине 50 см падение температур 5° на 3,9 м, или $1,3^\circ/\text{м}$.

Между поперечными сечениями II и III в продольном сечении I на глубине 10 см рост температуры равен $6,35^\circ/\text{м}$; здесь повышение температуры одинаково с поверхностным слоем, на глубине же 50 см это повышение даже более интенсивно, чем на поверхности, и равно $10^\circ/\text{м}$.

Продольное сечение 2 между II и III на глубине 20 см дает повышение температуры $1,25^\circ/\text{м}$, на глубине 50 см — $1,25^\circ/\text{м}$. В продольном сечении 3 между II и III на глубине 20 см падение температуры $3^\circ/\text{м}$, а глубина 50 см — 2° на м, или $0,4^\circ/\text{м}$.

Из всего сказанного можно заключить, что наиболее резкие температурные перепады наблюдаются на поверхности стекломассы и в части бассейна более нагретой, т. е. близкой к потоку.

Чем глубже в стекломассу, тем меньше падение температуры по длине печи. Сравнивая три продольных сечения, из которых 1-е проходит по центру печи, а 2-е и 3-е удалены соответственно по 0,5 и 1,5 м от центра, нужно отметить, что эта закономерность сохраняется для всех них, несмотря на то, что абсолютные температуры отдельных сечений значительно разнятся между собой. Так например на поверхности измерены температуры:

$I-1100^{\circ}$ и $II-1050^{\circ}$	в сечении	I
$I-1115^{\circ}$ и $II-1053^{\circ}$	" "	2
$I-1120^{\circ}$ и $II-1067^{\circ}$	" "	3

Отсюда видно, что температура стекла повышается по направлению от центра ванны к сечению 3, по которому очевидно движется горячий поток с температурой на 20° выше, чем температура в центре. Этот горячий поток настолько силен, что дает чувствовать себя и в поперечном сечении III ; в то время как в продольных сечениях 1 и 2 наблюдается повышение температуры от 2 к 3, здесь налицо постепенное падение от 1 к 3, что характеризует мощность потока и трудность уравнивания его температуры с температурой окружающего стекла.

В более холодной части ванны, между II и III поперечными сечениями, эта полученная ранее закономерность отчасти теряется, заменяясь постепенным понижением температур; лишь в продольном сечении 3, в котором, как указано выше, движется горячий поток, эта закономерность опять обнаруживается. В сечении 2 также наблюдается отклонение, но очень слабое, равное $1,25^{\circ}/м$ на глубине 20 и 50 см, тогда как на поверхности уменьшение температуры всего лишь $0,5^{\circ}/м$. Зато в сечении 1 отклонение значительно, а на глубине 50 см равно $10^{\circ}/м$ по сравнению с $6,25^{\circ}/м$ у поверхности.

б) По ширине рафинажного бассейна поверхностные температуры измерялись из окон № 1, 2, 3, 5, 6 по нескольким радиальным направлениям — лучам — из каждого окна. Измерения производились при двух различных температурных режимах газовой среды, отличающихся между собой на $50-60^{\circ}$, т. е. в тех пределах, которые наблюдаются в производственных условиях.

Таким образом получено две серии наблюдений: одна — при температуре $1180-1200^{\circ}$, другая — при температуре $1220-1240^{\circ}$.

К сожалению, не было возможности производить наблюдения параллельно из двух симметрично расположенных окон: 1 и 6, 2 и 5, поэтому картина, полученная при обследовании, несколько односторонняя, т. е. при повышенном температурном режиме проведен пирометраж левой части ванны, а при пониженном — правой части. Методика измерений была такова: прибор вводился в печь и устанавливался в точке, лежащей на 250 мм от стены и на глубине 20 мм ниже уровня стекла.

Каждый луч имел от 8 до 12 точек. Общее количество точек поверхностного пирометража 144, причем измерения производились по несколько раз в одной и той же точке.

1. Пирометраж при повышенном температурном режиме. В этом случае изучалась левая сторона бассейна из окон № 1, 2, 3 по шести поперечным лучам. Луч *а* окна № 1 лежит на расстоянии 1,1 м от протока и имеет температурный максимум в центре печи, а затем идет постепенное понижение температур по направлению к стенке.

Стенка — 1115° — 1119° — 1119° — 1120° — 1126° — 1137° — центр.

Как видно, разность температур между центральной и боковой точками равна 12°, что является очевидно следствием поднимающейся из протока горячей струи стекломассы.

Второй луч *б*, проходящий в центре окна № 1, сохраняет эту же закономерность, т. е. наблюдается постепенное падение температуры от центра к стенке, с максимумом в центре печи.

Стенка — 1102° — 1105° — 1110° — 1110° — 1112° — 1113° — 1119° — 1119°.

Здесь разность температур между крайними точками 17°, т. е. больше на 5°, чем в луче *с*, однако абсолютные температуры этого луча ниже чем температуры луча *с*.

В третьем луче *а* картина совершенно противоположна: здесь, в центре печи, лежит температурный минимум, а по направлению к боковой стенке идет повышение температуры.

Стенка — 1125° — 1125° — 1125° — 1125° — 1123° — 1121° — 1120° — 1121° — 1121° — 1121° — центр.

Однако здесь разность температур между крайними точками очень незначительна по сравнению с предыдущими лучами, и весь луч *а* имеет почти одинаковую температуру, но по абсолютному значению температура этого луча высока и значение его максимума почти одинаково со значением максимума луча *б*.

Из окна № 2 пирометраж произведен также по трем лучам — *а*, *б* и *с*, расположение которых видно на рис. 1.

Абсолютная температура здесь значительно ниже, чем в окне № 1, и постепенно понижается от луча *с* к лучу *а*. Луч *с* имеет волнообразное распределение температур с двумя максимумами: один с температурой 1093° находится в центре печи, а другой — с температурой 1090° на расстоянии 1 м от боковой стенки; промежуточные температуры отличаются между собой незначительно — на 3—6°.

Стенка — 1073° — 1030° — 1032° — 1090° — 1033° — 1033° — 1033° — 1039° — 1091° — 1090° — 1091° — 1093° — центр.

Средний луч *б* окна № 2 имеет максимум на середине печи, причем в сторону стенки температура равномерно понижается. Здесь перепад температур очень значителен.

Стенка — 1032° — 1078° — 1060° — 1066° — 1070° — 1083° — 1033° — 1033° — 1038° — 1089° — 1092° — центр.

Третий луч *а* имеет максимум на расстоянии 1,5 м от центра при равномерном понижении температуры к стенке и к центру,

причем в крайних точках температуры по абсолютному значению почти одинаковы.

Стенка— 1078° — 1030° — 1030° — 1030° — 1082° — 1089° — 1089° — 1088° — 1032° — 1080° .

Из рассмотрения схемы распределения температур на поверхности стекломассы в целом видно, что изотермы обнаруживают несколько горячих «пятен», характеризующих понижающуюся снизу горячую струю; таковы площадки в центре печи около протока с температурой 1127° и площадка по лучу *a* окна № 1 у стены, а также в центре печи, против окна № 2.

Интересным является то, что средние лучи *b* обоих окон имеют температуру ниже, чем лучи соседней *c* и *a*, хотя логично было бы, чтобы лучи *b* имели температуру выше, чем *a*.

Такое температурное распределение очевидно является следствием присоса воздуха через открытые во время измерения окна; присос сильнее сказывается на центральном луче, не защищенном стенкой от струи воздуха.

Это предположение подтверждается еще и тем, что при работе на правой стороне печи это явление почти не наблюдалось, при этом нужно отметить, что правая сторона обращена внутрь здания и не имеет возле себя никаких окон, тогда как левая сторона выходит к фасаду здания, имеющему большое количество постоянно открытых окон.

2. Пирометраж при пониженном температурном режиме. С правой стороны печи из окон № 5 и 6 (рис. 1) измерения производились при температуре газовой зоны 1130 — 1200° , по лучам симметричным левой стороне; кроме того дополнительно были промерены еще 3 луча из окна № 1.

Естественно, что благодаря сниженным температурам газовой среды абсолютные значения поверхностных температур тоже значительно ниже, чем в первом случае.

Первый луч *b* окна № 6, лежащий ближе всех к потоку, имеет явно выраженный максимум у правой стенки, температура которого на 12° выше, чем в центральных точках.

Центр— 1095° — 1093° — 1105° — 1103° — 1103° — 1107° — 1107° —стенка.

Следующий луч *b* имеет во всех точках температуру, отличающуюся на 1 — 2° , т. е. колебания настолько незначительны, что не превышают пределов возможной ошибки, и можно считать, что по всему лучу, кроме крайней точки, характеризующей опускающийся у стены охлажденный поток, температуры одинаковы.

Центр— 1101° — 1100° — 1100° — 1099° — 1099° — 1100° — 1100° — 1093° —стенка.

Луч *b* явно выраженного температурного максимума не имеет, температура падает очень постепенно от центра к стенке.

Луч *a* также не имеет явно выраженного максимума; температуры соседних точек разнятся на 1 — 3° .

Центр— 1105° — 1102° — 1105° — 1103° — 1104° — 1103° — 1104° — 1103° — 1105° — 1103° —стенка.

Измерения, произведенные из окна № 5, дали для луча *c* мак-

симум 1051° в центре печи с постепенным понижением к стенке, где температура спускается до 1030° .

Центр— 1051° — 1050° — 1040° — 1043° — 1045° — 1043° — 1042° — 1042° — 1041° — 1041° — 1040° — 1033° .

Центр— 1047° — 1043° — 1043° — 1042° — 1043° — 1043° — 1047° — 1047° — 1047° — 1043° — 1044° —стенка.

Луч *б* явно выраженного температурного максимума не имеет, температура падает очень постепенно от центра к стенке.

Центр— 1048° — 1043° — 1043° — 1043° — 1043° — 1047° — 1047° — 1047° — 1047° — 1043° — 1042° —стенка.

Луч *а* окна № 5 имеет такой же характер распределения температуры, как и луч *с*: максимум в центре печи 1042° , минимум у стенки 1025° .

Центр— 1042° — 1041° — 1040° — 1039° — 1038° — 1036° — 1035° — 1035° — 1035° — 1032° — 1025° —стенка.

При этом же температурном режиме были проведены повторные измерения окна № 1 для луча *б* и *а*.

Луч *а* дал максимум на расстоянии 1,2 м от стенки при равномерном падении к центру и к стенке.

Стенка— 1075° — 1085° — 1085° — 1087° — 1085° — 1033° — 1032° — 1031° — 1075° — 1075° —центр.

Луч *б* определенного максимума не имеет; соседние точки отличаются на $2-3^{\circ}$.

Стенка— 1085° — 1083° — 1035° — 1085° —центр.

Б. Глубинный пирометраж рафинажного бассейна

Следующим этапом работы является глубинный пирометраж стекломассы. Провести эту работу удалось лишь на глубине до 50 см, пользуясь поверхностным «щупом» Бромлея, так как в своде нельзя было пробить отверстия для пропуска глубинного пирометра.

Измерения температур в глубине стекломассы производились только с одной левой стороны бассейна по трем поперечным сечениям — центральным лучам окон № 1, 2 и 3.

Изучая изотермы, полученные в поперечном сечении по лучу *б* окна № 1, видно, что характер поверхностных температурных перепадов сохраняется и на глубине, причем, как уже отмечено раньше, эти перепады значительно меньше в глубине, чем на поверхности (рис. 12 и 12а).

Луч *б* окна № 1 опять показывает наличие горячего потока с левой стороны протока, только несколько смещенного влево по отношению к первоначальным полученным поверхностным температурам.

Этот поток движется на расстоянии 1 м от боковой стены, к центру от него температуры постепенно понижаются, и в поверхностном слое разница температур достигает 25° .

В глубинных слоях перепады также достигают 20° , что почти соответствует падению температуры на поверхности. Луч *б* окна № 2 дает аналогичные результаты, указывая на наличие горячего потока на расстоянии 1 м от стенки. Температура поверхности

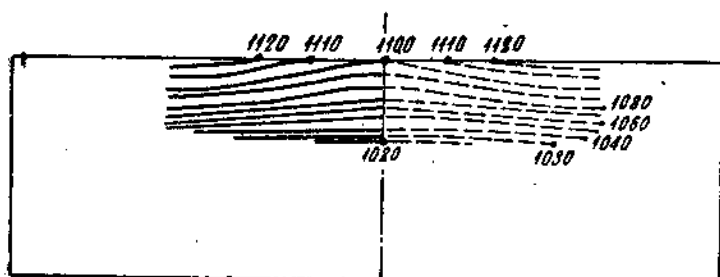


Рис. 12. Разрез по окну (луч *b*) № 1.

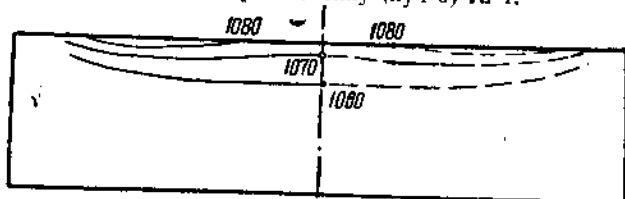


Рис. 12а. Разрез по окну № 1 (луч *a*).

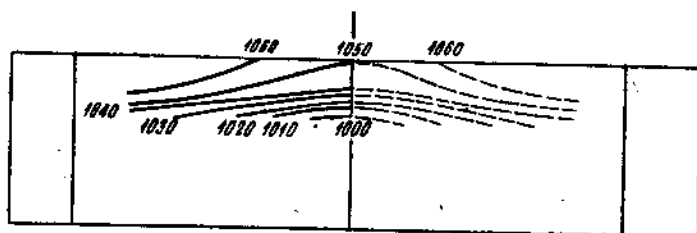


Рис. 13. Разрез по окну № 2 (луч *b*).

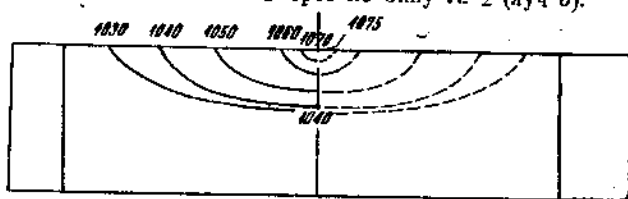


Рис. 14. Разрез по окну № 3 (луч *q*).

этого потока 1067° , и по направлению к центру она падает до 1050° , т. е. на 17° , несколько меньше, чем в сечении № 1 (рис. 13).

Зато глубинные слои дают здесь больший перепад температур, чем поверхностные. На глубине 20 см температура на том же расстоянии падает на 22° , а на глубине 50 см — на 40° .

Поперечное сечение по окну № 3 показывает смещение горячего потока по направлению к центру, от которого он движется на расстоянии 0,5 м. По направлению к стенке температура резко понижается — с 1075° до 1032° , т. е. за 2 м падает на 43° .

На глубине 20 см перепад точно такой же, как и на поверхности; на глубине 50 см — несколько меньше (рис. 14).

На основании полученных результатов можно сказать, что по ширине ванной печи температуры, как и следовало ожидать, падают более резко, чем по длине. Например по длине бассейна на протяжении 4 метров падение температур на $5-10^{\circ}/м$, как максимум на 20° , здесь же на расстоянии 250 мм падение температур достигает от 5 до 20° , или на 1 м от 20 до 80° .

Далее, в окне № 1 в поверхностном слое перепад температур на 2 м — 25° , т. е. удельный перепад $12,5^{\circ}/м$; на глубине 20 см перепад температур примерно тот же — $13^{\circ}/м$; на глубине 50 см — также $13^{\circ}/м$. Как видно, эти перепады почти в 10 раз больше тех, которые характеризовали продольные сечения, где перепады температур равнялись всего $1,5-2^{\circ}/м$.

На основании поверхностного и глубинного пирометража рафинажной части бассейна можно сделать выводы, что вследствие разницы в температурах и следовательно в вязкости и удельных весах стекломассы, вызванных наличием прожога, а также местными перегревами, благодаря влиянию факела горения варочной части в рафинажном бассейне печи наблюдается явление «блуждающего Quellpunkt'a», существование которого в печах типа Симплекс предполагалось ранее.

Вследствие того, что «Quellpunkt» не имеет более или менее постоянного местонахождения, картина потоков в рафинажно-выработочной части часто и резко меняется в зависимости от температурного режима самой печи и даже от характера факела горения с той или другой стороны ее.

Ясно, что наладить постоянный длительный режим машин Фурко при условии частых изменений состояния стекломассы не представляется возможным, особенно в тех случаях, когда одна сторона стекломассы в канале имеет температуру, отличающуюся от другой стороны. Результатом этого и может явиться разнотолщинность ленты по ширине, довольно часто наблюдающаяся в работе машин.

По данным эксплуатации перешеечных ванн известно, что при работе с фидерами (например, бутылочная ванна типа «Симплекс») часто наблюдают наличие отличающихся друг от друга потоков стекломассы, направляющихся то в один, то в другой фидер, различно расположенных относительно оси протока.

Данное исследование, подтверждая наличие «блуждающего Quellpunkt'a», являющегося результатом узкого перешейка, не могущего обеспечить гомогенизацию достаточно широкого потока, показывает, что для выработки оконного или зеркального стекла этот тип печей мало пригоден, потому что различие в физических свойствах отдельных струй потока стекломассы может наступить от ряда случайных причин. Систематизировать же эти случайности весьма затруднительно, и ванна, не обеспечивая стабильности потока, является капризной в эксплуатации. Однако совсем отказываться для данного производства от типа перешеечных ванн нет оснований. Необходимо далее исследовать вопрос об оптимальной величине сечения протока (перешейка). С этой точки зрения большой интерес пред-

ставляет изучение работы ванны системы Фурко для оконного стекла, реконструированной по идее инж. С. С. Бермана (Константиновка).

В. Глубинный пирометраж канала Фурко

Глубинный пирометраж канала Фурко производился в кюльдезаках всех четырех машин.

Расположение точек измерения видно из схематического изображения на рис. 15.

Пирометраж производился прибором конструкции проф. Бромля, подробная характеристика которого приведена в работе Ин-та стекла по заводу им. Уханова в Москве.

При работе прибор устанавливался на определенную вертикаль, а затем постепенным погружением проходил через все точки. Каждая вертикаль имела 5 точек, из которых первая находилась на глубине 10 см, а каждая следующая—через 15 см от предыдущей. Нижняя точка лежала на высоте 17 см от дна канала.

В дальнейшем приведены результаты измерений для каждой отдельной машины (рис. 16, 16а, 17, 18, 19, 20).

Сравнивая две схемы (рис. 17 и 18), сразу видно, что предположения, сделанные на основе глубинного пирометража рафинажного бассейна, были правильны.

Здесь взяты две серии измерений при одинаковом режиме газовой среды и с одинаковой толщиной ленты, а вместе с тем разница в температурах стекломассы очень велика, и не только в поверхностных слоях, но и по всей глубине канала. На рис. 16 температура в первых точках вертикалей одинакова и равна 1100°.

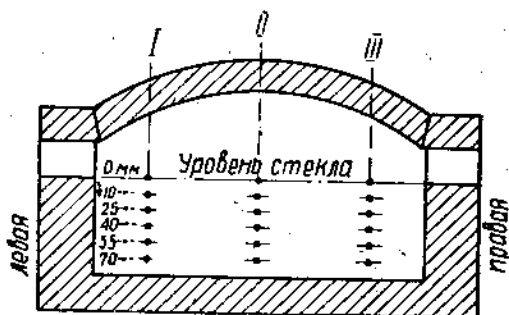


Рис. 15. Расположение точек измерения температур по глубине стекломассы в канале Фурко.

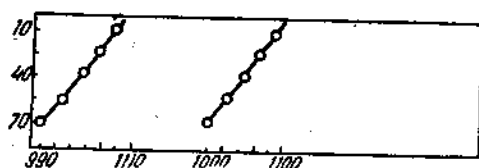


Рис. 16. Распределение температур в стекломассе подогревательной камеры маш. № 1 (толщина ленты 6,3 мм).

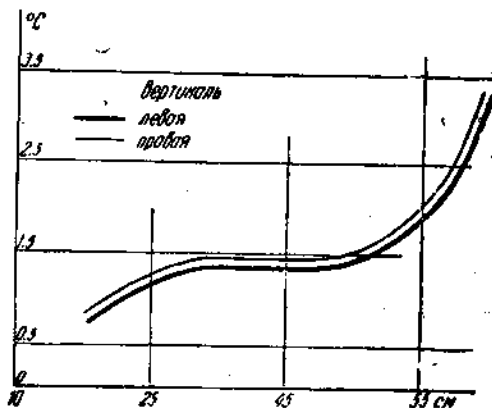


Рис. 16а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 1.

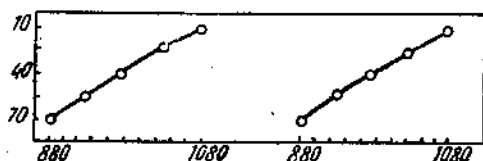


Рис. 17. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры в маш. № 1 (толщ. ленты 6,3 мм).

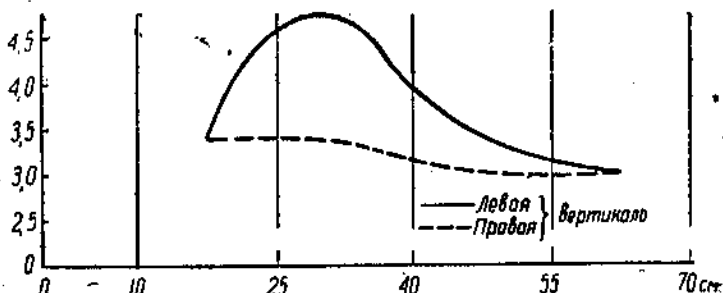


Рис. 17а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 1.

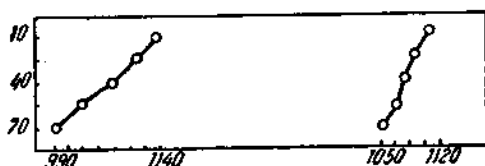


Рис. 18. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры в маш. № 1 (толщ. ленты 4,8 мм).

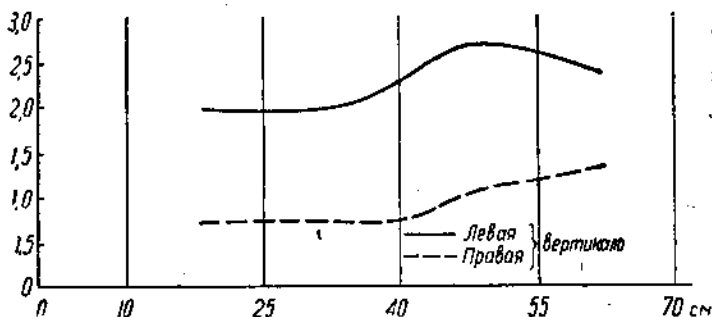


Рис. 18а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 1.

в следующих точках температура последовательно снижается на 17—20—20—35°.

На рис. 17 абсолютные значения температур на 20—25° ниже, чем на рис. 16, а само падение температур более резко, чем в первом случае, давая соответственно 40—50—50—45°, т. е. примерно вдвое больше, чем в первом случае.

На рис. 18 и 19 изображены характерные для непостоянства

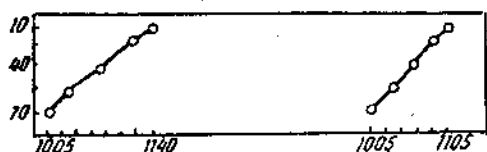


Рис. 19. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры в маш. № 1 (толщ. ленты 4,8 мм).

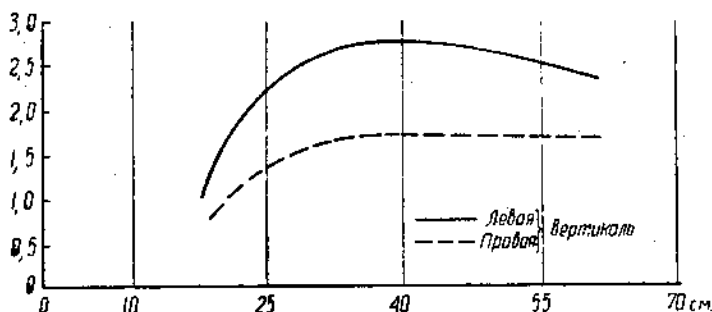


Рис. 19а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 1.

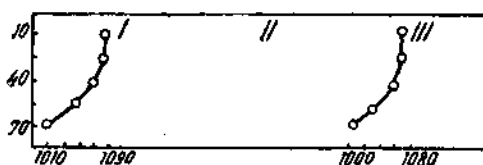


Рис. 20. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры в маш. № 1 (толщ. ленты 4,8 мм).

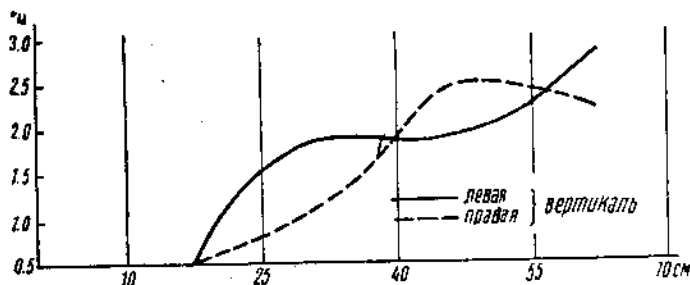


Рис. 20а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 1.

режима канала случаи, когда одна сторона канала значительно перегрета по сравнению с другой. Эта разница в температурах на рис. 20 составляет 20° , а на рис. 21 — 35° для верхнего слоя и по мере углубления совершенно сглаживается; наоборот, в первом случае эта разница становится еще более резкой, так как по вертикали 1 температурные перепады составляют $30-40^{\circ}$, а по вертикали 3 температура падает на $10-$

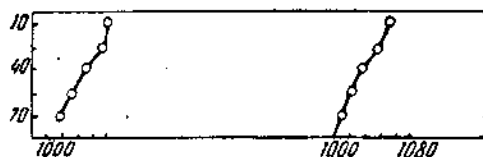


Рис. 21. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры маш. № 2.

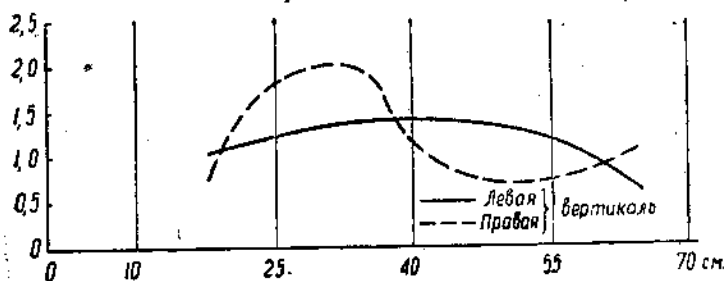


Рис. № 21а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 2.

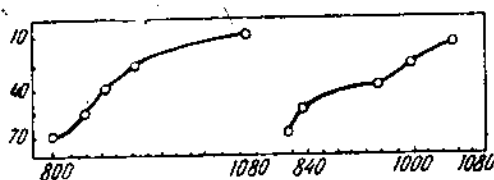


Рис. 22. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры маш. № 2.

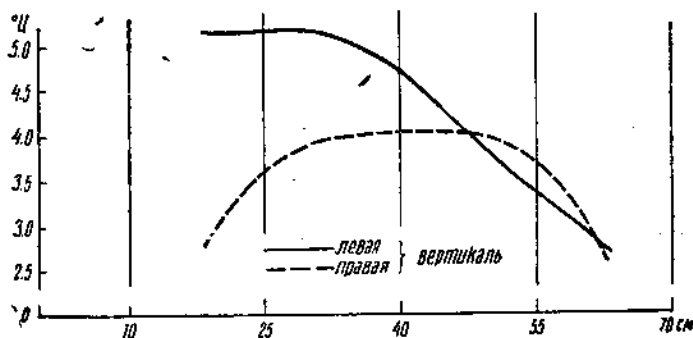


Рис. № 22а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 2.

20°. Общее падение температуры по вертикали 3 составляет 135°, а по вертикали 3 — 35°. На рис. 20 представлен случай, когда температурный режим газовой среды был понижен на 60° по отношению к первоначальным измерениям. Падение температуры по глубине очень незначительно и составляет для верхних слоев

от 0 до 10° , а для нижних слоев падение гораздо более резко — $25-35^{\circ}$ (рис. 21, 22, 23, 24, 25).

Измерения, результаты которых здесь изображены, производились в различные дни, но при одинаковом температурном режиме газовой среды: $1140-1150^{\circ}$.

На рис. 22 левая и правая вертикали в верхних слоях имеют одинаковую температуру, а по мере опускания правая вертикаль, имеющая меньшее падение температуры по глубине, дает более высокие температуры в нижних слоях, чем левая; в нижних точках разница равна 40° . На рис. 23 верхние слои левой стороны горячее правой, а на глубине 60 см температура выравнивается. На рис. 24 температуры на поверхности резко различные, на глубине 10 см выравниваются и падают почти равномерно. На рис. 25 дано изменение температур при толщине ленты 8 мм. На рис. 26, 27, 28 и 29 даны распределения температур в стекломассе подогревочной камеры машины № 4.

По абсолютным значениям температура в двух последних случаях, относящихся к подогревательной камере машины № 4, выше на $50-100^{\circ}$ на поверхности, тогда как в нижних слоях эта разница несколько сглаживается и становится равной $35-45^{\circ}$.

Это показывает, что изменение теплового режима ванны меняет температурное распределение в стекломассе канала на глубине 40—50 см, т. е. как раз те слои, которые, поступая под лодочку, вытягиваются в ленту. Нижние слои, более инертные, очевидно и медленнее обмениваются и лишь частично вырабатываются.

К сожалению полученные результаты нет возможности сравнить с данными нормально работающих установок, так как глубинный пирометраж стекломассы является совершенно новым методом температурного исследования.

Ленинградским областным теплотехническим ин-том было проведено обследование бельгийского «Фурко» на заводе «Белый бычок», но это обследование проводилось в совершенно ненормальных условиях работы канала при сниженном до 70 см уровне, и поэтому использовать результаты его в качестве сравнительного образца нельзя. Однако все же интересно провести некоторую параллель между результатами этих двух работ.

В работе ЛОТИ перепад температур между верхней точкой (на глубине 15 см) и нижней точкой (на глубине 75 см) равен в среднем 66° ; иногда, как исключение, 100° , т. е. в среднем $1,1^{\circ}/\text{см}$ глубины, или $1,67^{\circ}/\text{см}$; минимальная величина перепада $0,9^{\circ}/\text{см}$.

В настоящем обследовании максимальные перепады температур наблюдаются в кольдесаке машины № 4, вытягивающей оконное стекло. Здесь падение температур между верхней точкой (глубина 10 см) и нижней (глубина 70 см) равно в среднем 130° на 60 см, или $2,2^{\circ}/\text{см}$. В кольдесаках машин № 1 и 2, вытягивающих зеркальное стекло, падение температуры по глубине менее резко и для машины № 2 составляет 81° на 60 см, или $1,4^{\circ}/\text{см}$ в среднем, и один лишь раз, как исключение, наблюдался период 220° на 60 см, т. е. $3,7^{\circ}/\text{см}$.

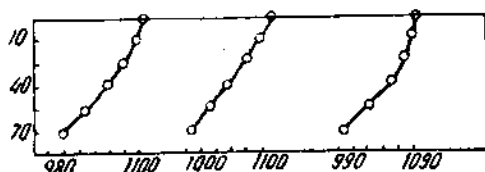


Рис. 23. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры маш. № 2.

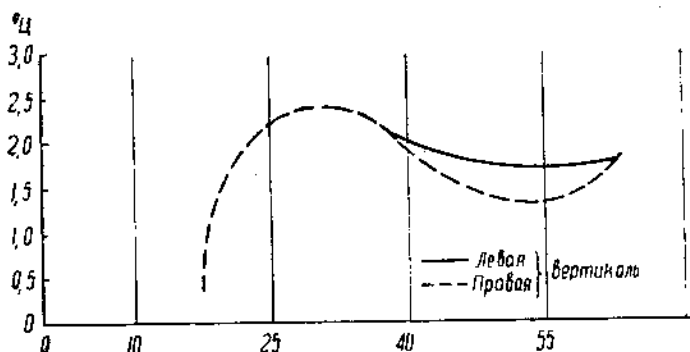


Рис. 23а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 2.



Рис. 24. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры маш. № 2.

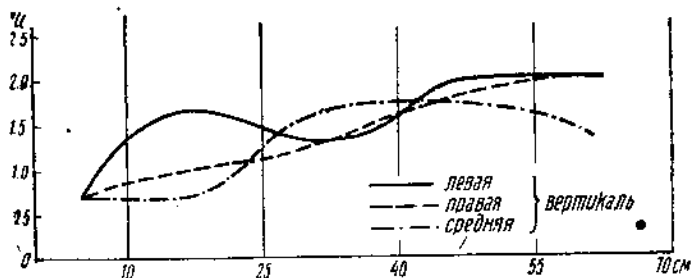


Рис. 24а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 2.

В кюльдеске машины № 1 также один раз наблюдался перепад в 195° на 60 см, или $3,2^\circ/\text{см}$, а обычно он составлял 93° на 60 см, или $1,5^\circ/\text{см}$.

Нужно отметить еще, что абсолютные значения температур в данном исследовании несколько выше, чем в исследовании ЛЮТИ. Очевидно это объясняется конструкцией самого канала

и удаленностью изучаемых камер от ванной печи. Распределение температур по ширине канала на заводе «Белый бычок» очень равномерно: по данным обследования температуры, во всех случайных измерениях на середине канала и на расстоянии 5 см от стены были одинаковы на различных глубинах.

Канал Константиновского завода не дает настолько равномерного падения по глубине и ширине; здесь точки, измеряемые в центре и на расстоянии 50 см от стен дают расхождение в 10—25°.

Графически изменения удельных падений температур представлены на рис. 16а, 17а, 18а, 19а, 20а, 21а, 22а, 23а, 24а, 25а, 26а, 27а, 28а по машинам № 1, 2 и 4; при разной толщине ленты и в разных температурах газовой среды.

По машине № 1 при одной и той же толщине ленты — 4,8 мм, но при разных температурах газовой среды: 1145°—1140°—1135°—1145°—1140°—1135°. При этом видно, что понижение температуры газовой среды уравнивает удельные падения по обеим вертикалям, т. е. перегрев является односторонним. По глубине удельные падения, как и следовало ожидать, возрастают, но разное, с учетом условий теплопередачи на различных горизонтах. При 1145° активный поток толщиной до 40—45 см, при 1140°—до 30—35 см, а при 1135°—ближе к 30 см. Таким образом следует фиксировать изменение в толщине движущегося потока под влиянием повышения температуры, что вызывает увеличение разности температур между нагреваемой и охлаждающейся поверхностями стекломассы (у стен, в подмашинной камере и т. п.).

Абсолютная величина падения температур на 1 см дает максимум 2,5—2,7°/см, перемещающийся от 45 см глубины до 55—60 см, где следовательно имеем мало теплопроводящие слои стекломассы.

При увеличении толщины ленты удельные падения остаются примерно те же, но фигуры изменения несколько иные, причем основным фактором все же являются температурные значения газовой среды. Следует отметить, что повышение на 10—20° газовой среды почти не отражается на температуре глубинных слоев (60—70 см) стекломассы.

Машина № 2 дает значительно большие удельные падения, достигающие до 5°/см. Однако, этому случаю (рис. 22а) не следует придавать большого значения, он может оказаться результатом случайного сочетания факторов; любопытно отметить, что в остальных сериях измерений (рис. 21а, 23а, 25а) на глубине 55—70 см удельные падения стабилизируются на цифре 1,0—1,2—1,5°/см. Общий характер кривых удельного падения по машине № 2 указывает на максимальные величины падения в средних слоях, что очевидно связано с другой конфигурацией потоков и с ориентировкой машины № 2 относительно канала и остальных машин. Правая и левая вертикали во многих случаях полностью совпадают по величинам удельных падений, что говорит о симметрии теплового режима.

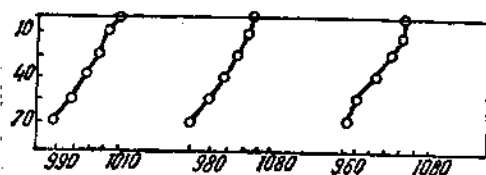


Рис. 25. Распределение температур в глубине стекломассы подогревательной камеры маш. № 2.

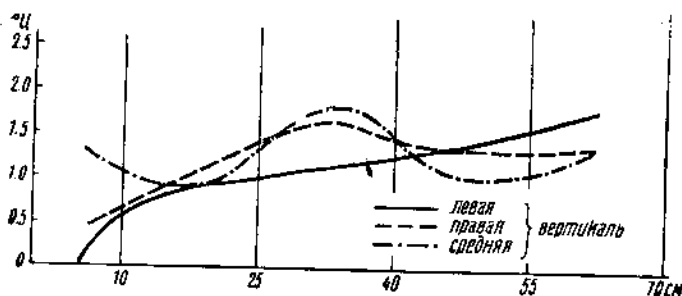


Рис. 25а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 2



Рис. 26. Распределение температур в стекломассе подогревательной камеры маш. № 4.



Рис. 26а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 4.

По машине № 4 кривые удельного падения температур имеют определенное образование: падения в глубинных слоях (55—70 см) имеют меньшую величину (1,5—1,7°/см), чем в поверхностных зонах (1,5—2,5°/см).

Разгадку этого явления можно искать в характере потоков, поступающих в машину, № 4 и отходящих из придонных слоев,

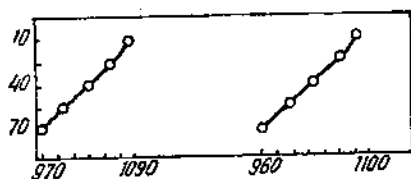


Рис. 27. Распределение температур в стекломассе подогревательной камеры маш. № 4.

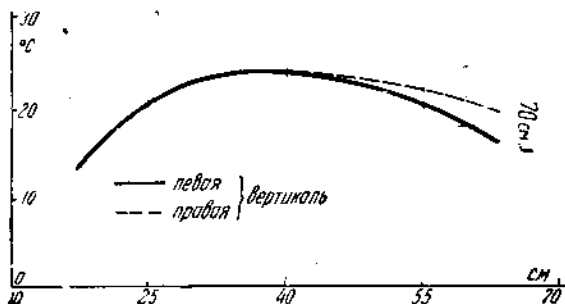


Рис. 27а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 4.

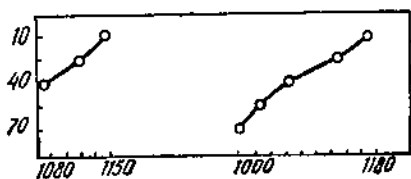


Рис. 28. Распределение температур в стекломассе подогревательной камеры маш. № 4.

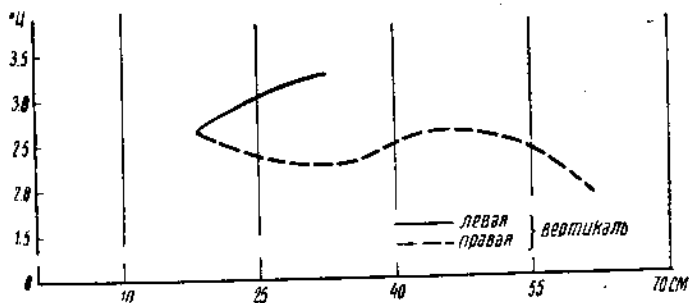


Рис. 28а. Удельное падение температуры по глубине маш. № 4.

так, как это указал Кониг в своем исследовании¹. В остальном принципиального отличия от машин № 1 и 2 нет.

Таким образом, резюмируя данные по распределению глубинных температур в канале, можно указать на следующее:

¹ Поток в стекломассе, Konig Glastechnische Berichte, 1929 г.

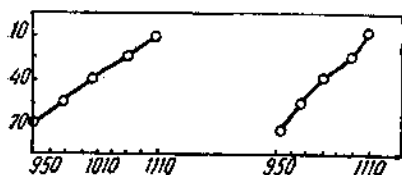


Рис. 29. Распределение температур в стекломассе подогревательной камеры маш. № 4.

1) увеличение толщины ленты не влияет заметным образом на теплопередачу в толще стекломассы;

2) изменение газовой температуры влияет на температуры в стекломассе только лишь в пределах 30—40 см;

3) самые глубинные (70 см) температуры по существу остаются постоянными и одинаковыми в

пределах 50—70° и заметно изменяются с конфигурацией глубинных потоков, связанных с расположением машин;

4) анализ данных по удельным падениям глубинных температур является вполне оправданным методологическим орудием к суждению как о теплопередаче в стекле, так и о схеме основных трасс потоков стекломассы.

Г. Пирометраж подмашинной камеры и шахты Фурко

Пирометраж подмашинной камеры машины № 2 производится по трем точкам по ширине камеры на высоте 20 см и на высоте 80 см от уровня стекла.

Нижний горизонт измерялся в шести точках с каждой стороны ленты, причем 3 точки лежали между лентой и холодильником на расстоянии 5 см от ленты, а 3 — между холодильником и стенкой камеры посередине расстояния между ними.

В самой шахте измерялась температура газовой среды вокруг ленты в трех точках по ширине, с каждой стороны ленты, на расстоянии 2 см от поверхности стекла (рис. 31).

Кроме температуры газовой среды в шахте измерялась температура одной ленты стекла путем впаивания в луковницу никель-хромовой термопары, которая поднималась вверх вместе с лентой, непрерывно давая показания температуры при движении ленты.

Вместе с этим измерялись температуры воздуха, окружающего шахту, на различных расстояниях от нее и на разных горизонтах с целью выяснить благоприятный тепловой режим окружающей шахту газовой среды.

На рис. 32, 33, 34, 35 и 36 изображены изменения температуры в шахте машины № 2 по ширине и высоте. Измерения эти производились в течение нескольких дней, и каждая кривая отражает результаты за один день при частоте наблюдения через каждые 3 мин.

Эти кривые показывают температуру воздуха, окружающего ленту стекла в подмашинной камере и шахте Фурко.

Благодаря влиянию холодильников, вблизи которых были установлены термопары в подмашинной камере, на всех кривых заметно сильное падение температуры от 1-го горизонта вниз

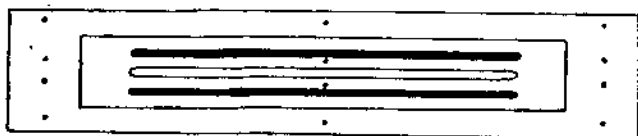


Рис. 30. Расположение контрольных точек в подмашинной камере.

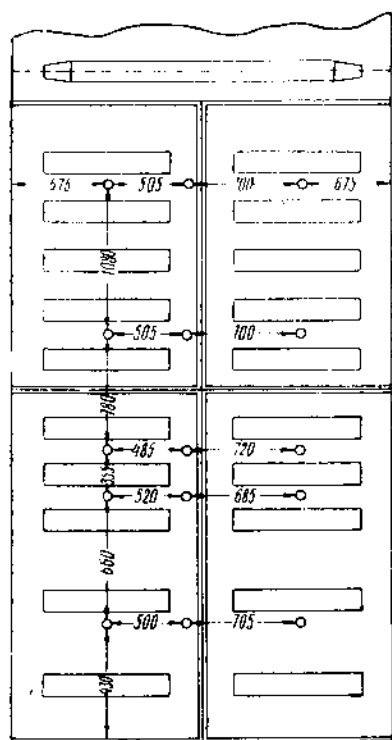
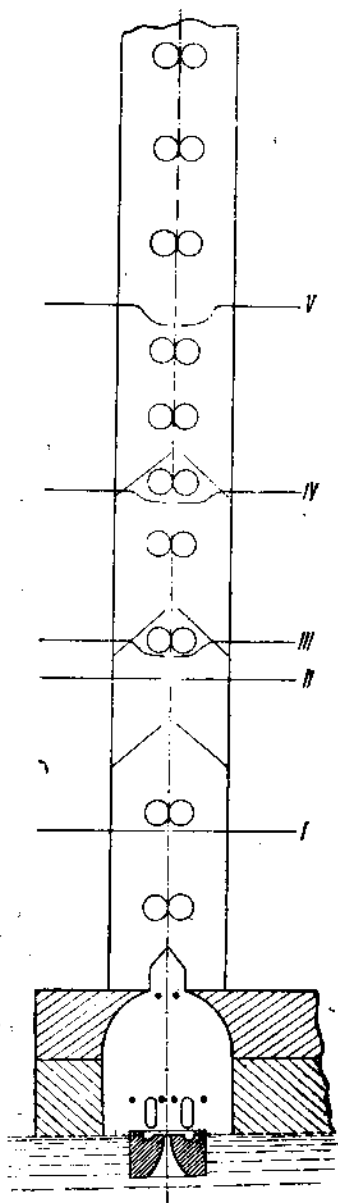


Рис. 31. Расположение контрольных точек по шахте Фурко и в подмашинной камере.



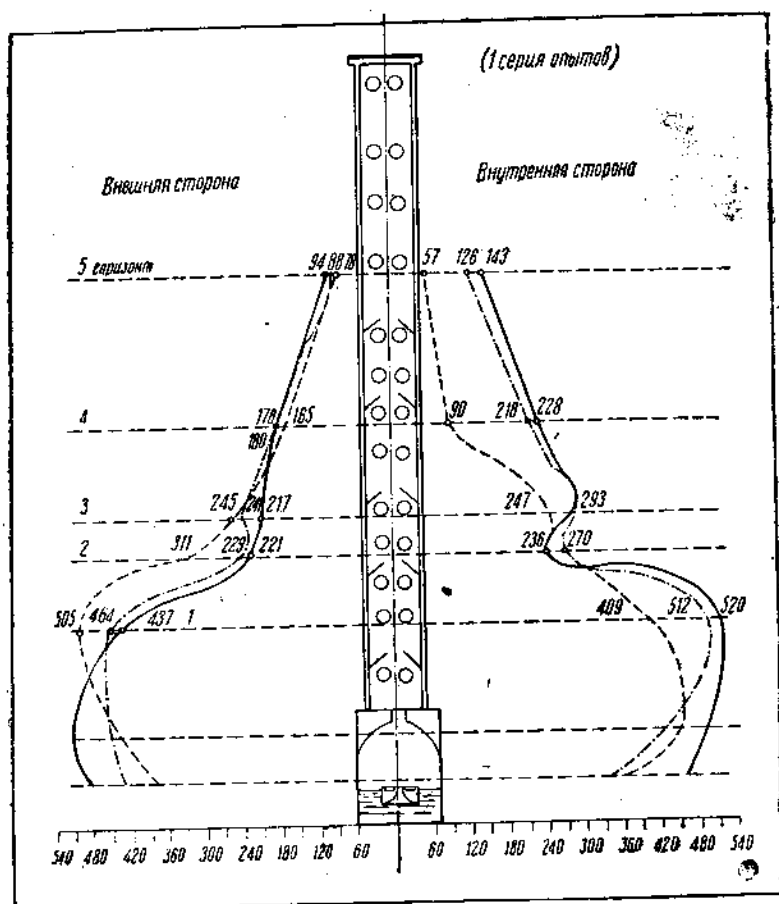


Рис. 32. Распределение температур по высоте шахты маш. № 2 (газовая среда) (1 серия опытов).

к подмашинной камере. Ясно, что температура самой ленты книзу не понижается, а повышается, как это видно из рис. 37.

Эта кривая получена для двух бортов, так как термопары впаивались в луковичы и проходили вместе с лентой до самого верха шахты, где вырезались из стекла.

По ширине шахты измерения производились в трех точках, расположение которых видно на рис. 31.

Результаты этих измерений показаны на рис. 38 и 39, где все 5 горизонтов условно перенесены на один; по оси абсцисс отложено расстояние между точками, а по оси ординат — температура.

На рис. 38 показаны температуры по внутренней, обращенной в сторону вагранной печи, части шахты, а на рис. 39 — температуры во внешней части, обращенной к машинному залу.

Следующая таблица дает сравнительные показания температур внутри шахты за пять дней, в течение которых производились, испытания машины (рис. 32—36).

*Распределение температур в шахте машины Фурко (№ 2)
(сравнительные показания за 5 серий опытов)*

№ серии наблюдений	1			2			3			4			5		
	Лев.	Центр.	Прав.	Лев.	Центр.	Прав.	Лев.	Центр.	Прав.	Лев.	Центр.	Прав.	Лев.	Центр.	Прав.
Горизонт точки															
внутренняя	409	520	512	446	469	548	404	532	470	407	438	445	416	541	535
I горизонт															
внешняя	505	437	464	504	492	532	482	514	535	473	507	535	505	502	520
внутренняя	270	236	261	366	269	369	342	333	270	226	238	266	250	185	354
II горизонт															
внешняя	311	221	229	291	—	355	350	—	402	211	—	321	232	—	343
внутренняя	247	293	294	279	194	327	270	—	284	269	249	311	258	258	311
III горизонт															
внешняя	245	217	241	280	241	314	253	250	313	281	237	331	235	257	306
внутренняя	99	228	218	193	219	259	183	215	239	198	197	245	169	223	245
IV горизонт															
внешняя	169	176	190	265	188	246	176	188	250	154	185	230	172	180	231
внутренняя	57	143	126	70	110	140	75	101	133	84	94	133	99	102	132
V горизонт															
внешняя	88	94	79	104	83	135	84	97	128	84	100	135	82	92	129

Примечание. Внутренняя сторона — та, которая обращена к ванной печи; внешняя — в машинный зал; левая — глядя от ванной печи слева.

Рассматривая сначала кривые падения температуры по высоте шахты, можно обнаружить, что температуры не симметричны по двум сторонам ленты, причем в нижних горизонтах картина непостоянна: иногда горячее внешняя, а иногда внутренняя часть. В верхних же горизонтах в большинстве случаев более нагрета внутренняя часть шахты. Это вполне естественно, так как внешняя часть омывается струями более холодного воздуха, в силу чего переохлаждается по отношению к внутренней части. Это особенно заметно в верхних горизонтах, где слабее сказываются как влияние теплоты, излучаемой сводом канала, так и бли-

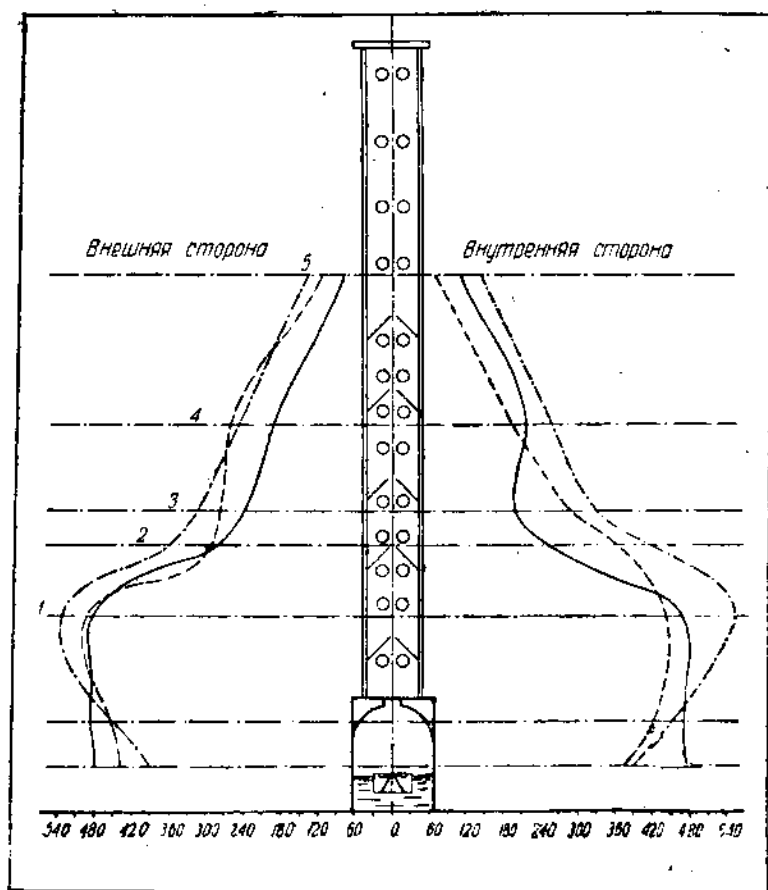


Рис. 33. Распределение температур по высоте шахты маш. № 2 (газовая среда) (2 серия опытов).

зость рабочих площадок у машин. Что касается падения температуры по высоте, то на всех кривых замечается резкое падение между 1 и 2 горизонтами, которое составляет в среднем 200° на высоте в 50 см, т. е. удельное падение температуры 4° на 1 см. Нужно отметить, что в зоне исчезновения натяжений, которая кончается несколько ниже 2-го горизонта, падение температуры должно происходить более постепенно. Пройдя зону исчезновения натяжений, можно допустить более быстрое падение температуры. В данном случае режим газовой среды представляет обратную картину: внизу температура падает быстро, а вверх, после 2-го горизонта, начинается падение со скоростью в среднем от 1 до $0,5^{\circ}$ на 1 см высоты шахты. Однако анализ кривой температуры самой ленты стекла показывает (рис. 38), что здесь падение температуры идет более нормально: в нижних

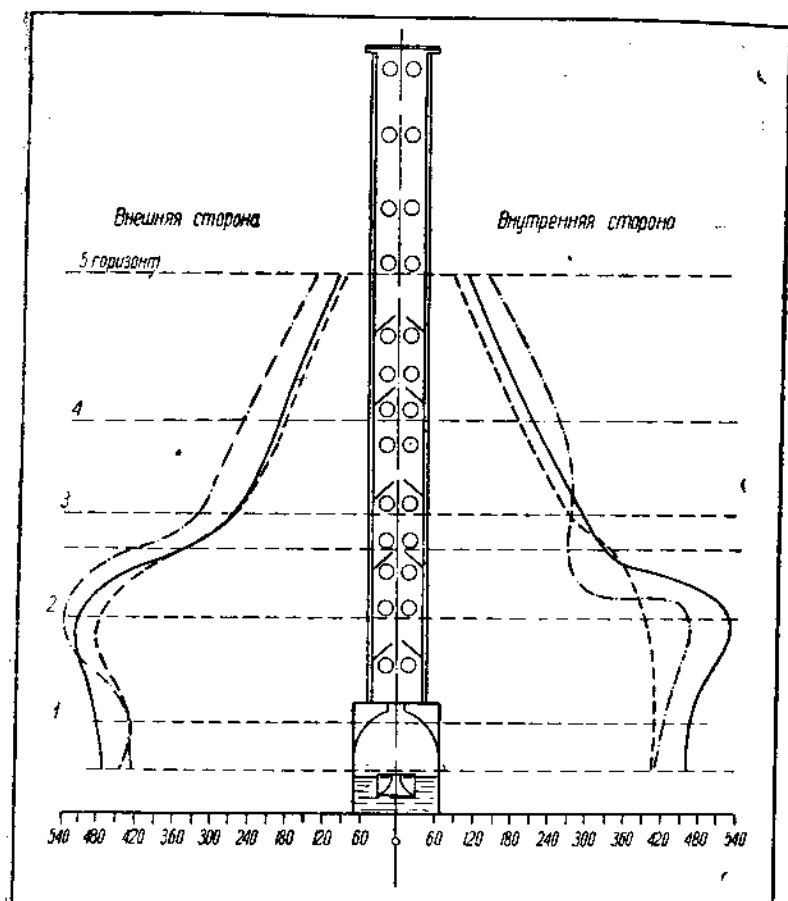


Рис. 34. Распределение температур по высоте шахты маш. № 2 (в газовой среде) (3 серия опытов).

зонах скорость падения температуры ленты на 1 м высоты составляет приблизительно $1,5^{\circ}/\text{с.м.}$ Нужно отметить еще большее непостоянство температурного режима шахты, что видно из значительных колебаний температуры в отдельных точках. Приведенные на рис. 37 кривые температур по высоте шахты показывают резкие перегибы, наличие которых объясняется либо расположением нижней площадки, либо образованием присоса холодного воздуха, сильно меняющего поперечное распределение температур газового пространства шахты.

Если проанализировать результаты измерений, приведенные в таблице и представленные графически на рис. 42, то видно, что наиболее сильные колебания температуры, доходящие в отдельные дни до 170° , наблюдаются во всех точках 2-го горизонта с обеих сторон ленты.

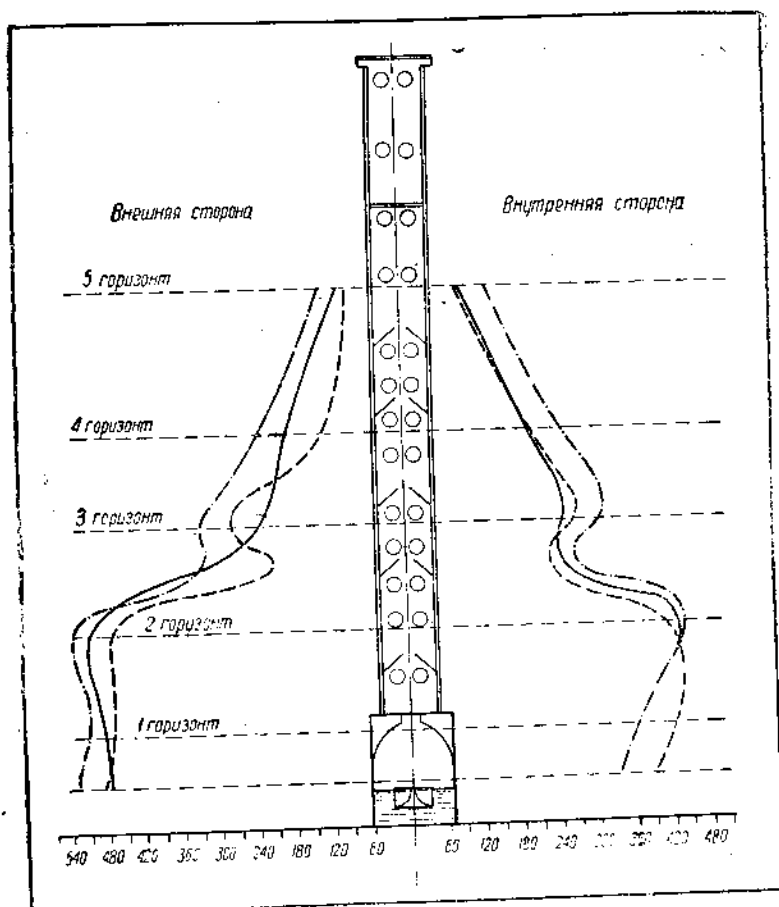


Рис. 35. Распределение температур по высоте шахты маш. № 2 (в газовой среде) (4 серия опытов).

Такую громадную разницу приходится отнести за счет частого открывания люков, расположенных на уровне первой площадки для спуска боя, введения «спичек» и т. д.

2-й горизонт лежит немного выше, и струя присасываемого холодного воздуха наиболее резко влияет на показания термометров этого ряда. В остальных горизонтах температура колеблется не так значительно: 1-й и 2-й горизонты дают еще довольно большие колебания — от 30 до 110° для различных точек, однако, чем горизонт выше, тем колебания температуры становятся меньше, и для 4-го и 5-го горизонтов составляют от 15 до 60°. Это объясняется тем, что в нижних порядках зонах даже незначительный присос воздуха резко сказывается на состоянии сильно нагретой внутри шахты газовой среды, тогда как вверху шахты, где температуры значительно ниже, струя воздуха той же температуры

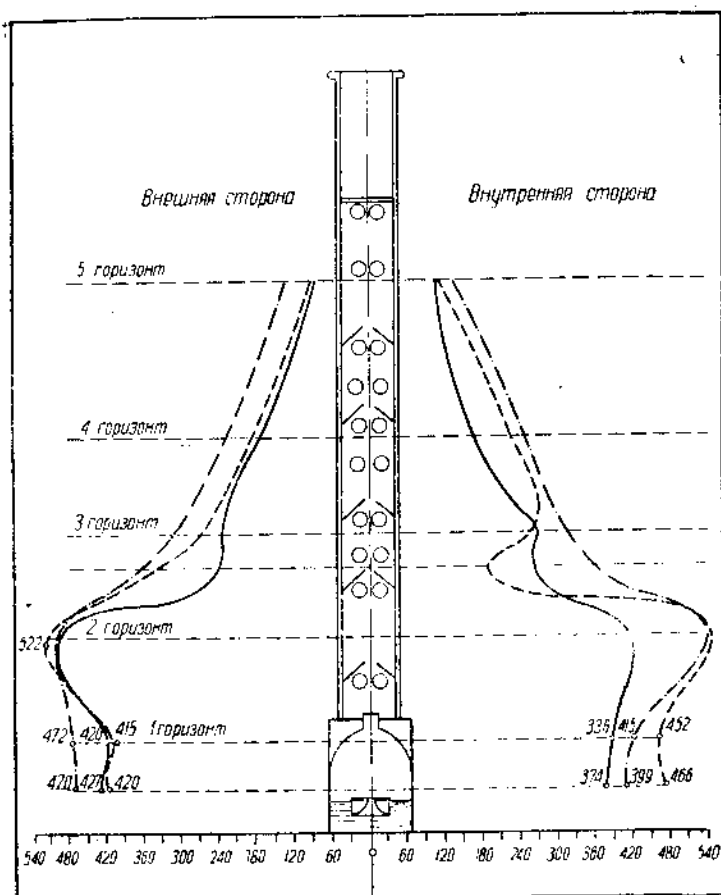


Рис. 36. Распределение температур по высоте шахты маш. № 2 (в газовой среде) (5 серия опытов).

прислуживает значительно меньшее охлаждающее действие. Кроме того здесь сказывается компенсирующее влияние верхней площадки. Исследованные далее кривые распределения температур по ширине шахты Фурко (рис. 38 и 39) дают ясную картину пересохлаждения левой стороны шахты.

Как внутренняя, так и внешняя стороны шахты имеют слева температуру гораздо более низкую, чем справа.

Для верхних горизонтов (5-й и 4-й) внутренней стороны изменение температуры по ширине шахты идет с постепенным повышением от левого борта к правому, т. е. самую низкую температуру имеет левый борт, несколько горячее — на 15—20° — центр и еще горячее — на 30—40° — правый борт.

В нижних горизонтах (2-й и 3-й) этой же стороны изменение температуры имеет другую закономерность: от левого борта к

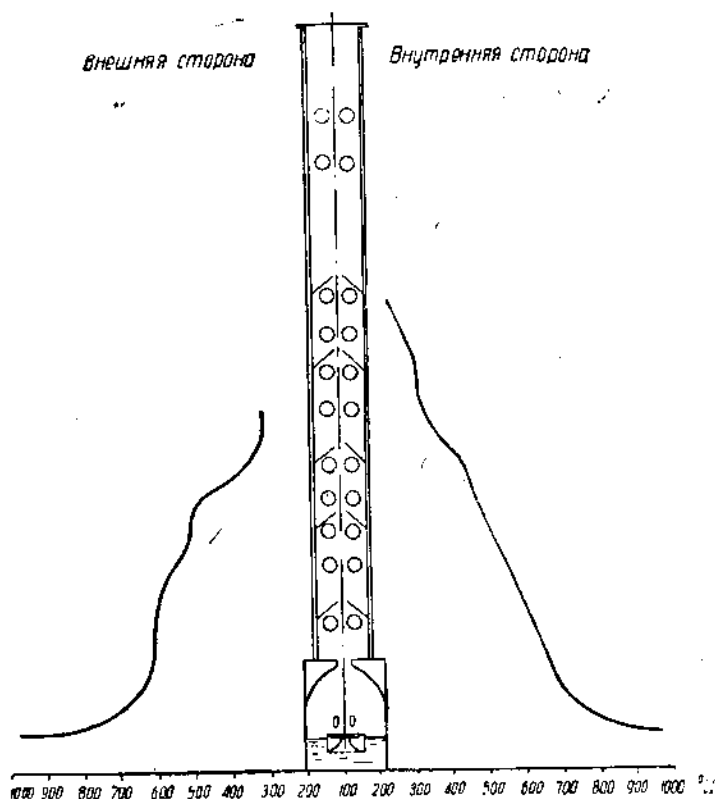


Рис. 37. Кривая температур ленты стекла по высоте шахты маш. Фурко № 2.

центру температура падает, получая в средней точке минимальное значение, а затем опять возрастает, имея максимум у правого края шахты. Однако самый нижний (1-й) горизонт иллюстрирует изменение температуры по тому же закону, что и верхние (4-й и 5-й).

Внешняя же часть дает по всей высоте кривые одного характера — с минимумом в центре шахты и максимумом у правого края, причем температуры краев разнятся в среднем на $20-30^\circ$ и иногда даже на $60-70^\circ$.

На основании указанного легко убедиться еще раз в том, какое огромное значение для теплового режима шахты имеют внешние атмосферные условия. Дело в том, что левая сторона находится как раз напротив двери и окон на улицу, которые всегда бывают открыты, тогда как правая торцевая часть машины выходит в неветилируемый угол здания.

Отсюда ясно, что охлаждение левой части машины идет за счет влияния более холодного внешнего воздуха. Для сравнения приводим еще 2 кривых на рис. 41 и 42, которые отражают тепловой режим шахты машины № 2.

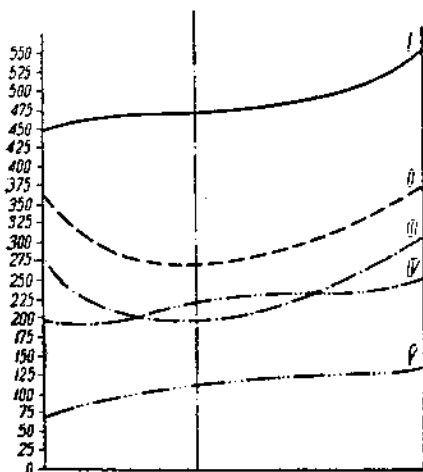


Рис. 38. Распределение температур по ширине шахты Фурко (внутренняя сторона).

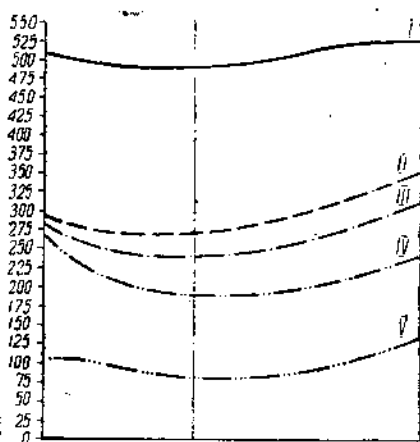


Рис. 39. Распределение температур по ширине шахты Фурко (внешняя сторона).

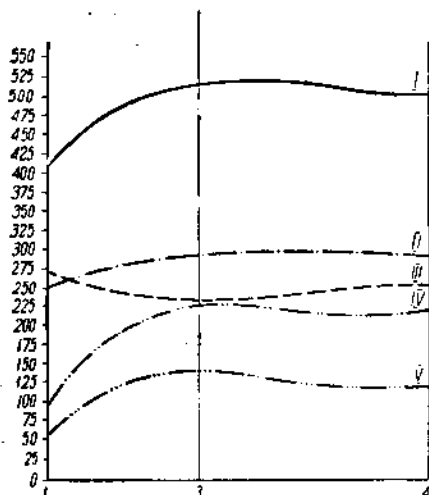


Рис. 40. Распределение температур по ширине шахты маш. № 2 (внутренняя сторона).

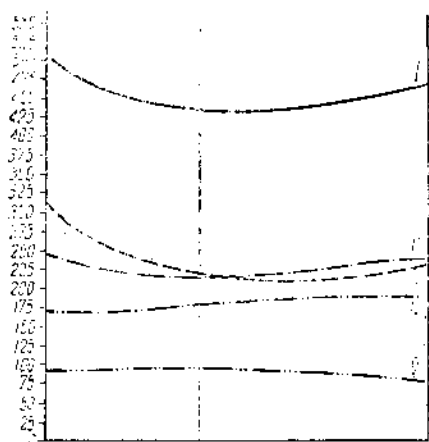


Рис. 41. Распределение температур по ширине шахты маш. № 2 (внешняя сторона).

Здесь на рис. 41, представляющем температуры внутренней части шахты, распределение их имеет совершенно иной характер. Во всех горизонтах, кроме 2-го, для которого вообще характерны наиболее резкие температурные колебания, температура центра равна или несколько выше температуры правого края, тогда как левый край опять показывает значительное охлаждение по отношению к правому, достигающее от 50 до 75°. По этим

кривым видно, что если бы не влияние холодного воздуха слева, то режим по ширине шахты был бы вполне нормальным, что нельзя сказать о кривых на рис. 38 и 39.

Однако наружная сторона шахты за приводимый период наблюдения даст картину, отличную от внутренней.

Здесь нижние горизонты 1-й, 2-й и 3-й дают слева очень высокую температуру, отличающуюся от симметричных точек внутренней стороны на 75—100°; центр имеет температуру более низкую, а к правому краю температура опять повышается. Верхние же горизонты 4-й и 5-й дают нормальную картину минимума слева, а температуры центра и правого края почти равны между собой. Причина этого перегрева становится ясной, если проследить записи журнала наблюдений, в которых указано, что во время измерений машина давала сильный бой и левый борт разогревался «спичками», чем и можно объяснить такой местный перегрев левой стороны шахты. Таким образом явление перегрева левого борта несколько не нарушает установленной общей закономерности.

Сравнивая кривые распределения температур по ширине шахты за два периода наблюдений, можно сразу же установить, что тепловой режим шахты за один указанный период неудовлетворителен: наличие присоса холодного воздуха, проходящего по середине шахты и сильно охлаждающего ее.

За другой же период тепловой режим гораздо лучше, присосов не было. Образцы стекол, взятые с лент за оба периода, подтверждают это. За день 5/VII машина давала бой, но не за счет плохого отжига, а за счет камня. Все образцы, взятые как с топа, так и с другого борта и из середины ленты, показывают вполне удовлетворительный отжиг.

Образцы стекол, взятые за другой период (3/VII), при просмотре через полярископ дают значительные остаточные напряжения, подтверждающие, что тепловой режим шахты был ненормальным. Ясно, что кроме температуры внешнего воздуха имеет значение и температура самой ленты по ширине, разница в которой вызывается неравномерным распределением по ширине самого канала Фурко.

На рис. 42 приведены изменения температур в шахте машины по ширине и высоте ее, иллюстрирующие неравномерный тепловой режим на отдельных горизонтах (данные — средние по 5 сериям наблюдений). Параллельно с изучением теплового режима внутри шахты шло, как уже сказано выше, наблюдение за температурами окружающего шахту воздуха (рис. 43).

На рис. 43 показаны распределение температуры около шахты на расстоянии 2 см, 25 см и 50 см от стенок ее. Указанные там 3 линии, лежащие ближе к шахте, показывают падение температуры по высоте и ширине ленты внутри шахты; следующие 3 линии показывают температуру воздуха у самой шахты и распределение температур по ширине.

По внешней стороне шахты эти температуры почти одинаковы: явление перегрева внизу у левого края можно отнести за счет

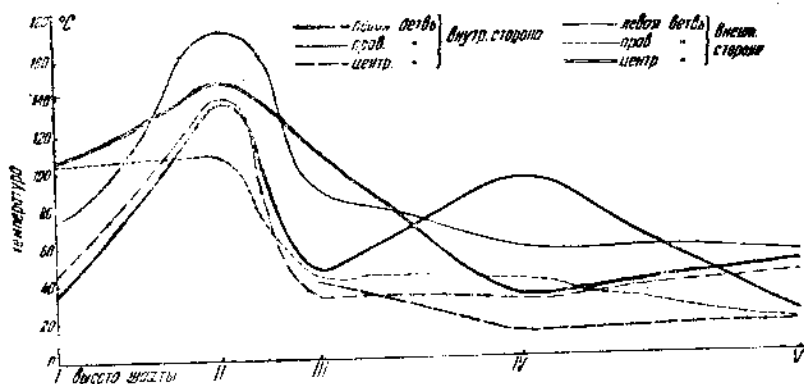


Рис. 42. Колебания температур в различных точках по высоте и ширине шахты Фурко (средние данные за 5 дней).

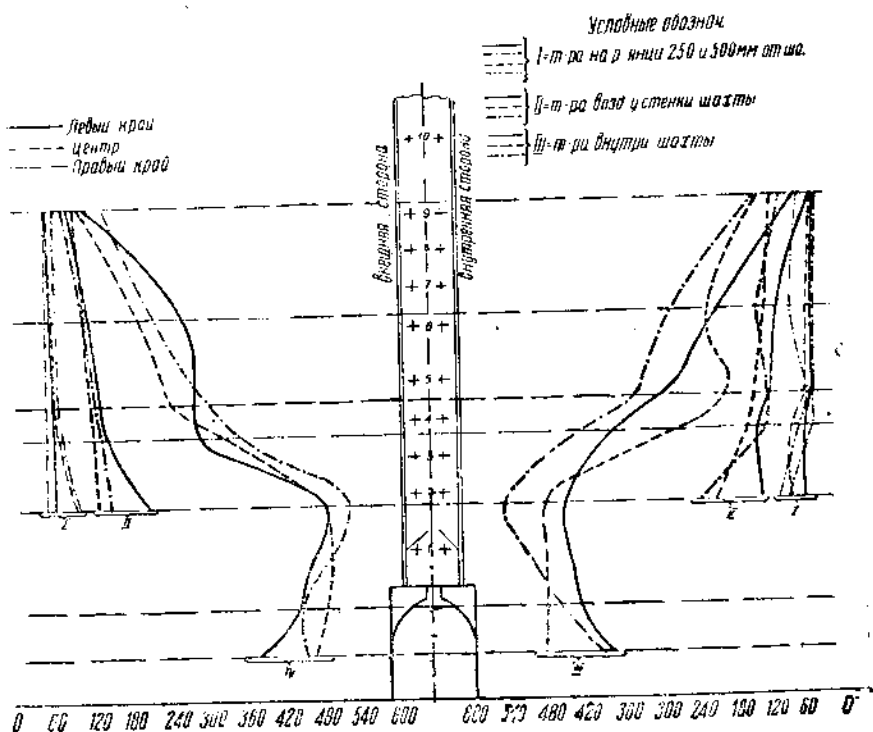


Рис. 43. Распределение температур по высоте внутри и вне шахты.

какого-либо случайного внешнего воздействия; возможно также, что это вызвано открытием противолежащих люков, создавшим конвекционный поток воздуха, идущего от машины. Следующая кривая внешней стороны, лежащая на расстоянии 25 см от шахты, отражает еще в нижней части влияние этого возможного тепло-

вого потока, но уже в меньшей степени. Здесь падение температуры на высоту в 50 мм равно 20° , тогда как в первой кривой оно равно 60° .

Следующая кривая на расстоянии 50 см от шахты уже совершенно не отражает наличия теплового потока и дает по всей высоте вертикальную прямую. Измерения, произведенные по центру у стены шахты, дают самые маленькие значения: немного выше температуры у правого края шахты, но падение температуры правого края и в центре идет по одному закону — по прямой линии, причем температурный перепад на высоту 2,9 м равен 80° для правого края и 50° — для центра.

На расстоянии в 25 см перепад температур становится еще меньшим — 20° на высоту 2,9 м. На расстоянии 50 см от шахты температуры совершенно выравниваются.

Внутренняя сторона шахты, обращенная к ванной печи, дает подобную же картину, однако здесь температура левой стороны шахты еще резче отличается от температур внешней стороны. Непосредственно около шахты максимальную температуру имеет центр и самую низкую — левая сторона. Температурный перепад по высоте 2,9 м для центра равен 90° , а для правого края 130° .

На расстоянии 25 см левый край опять имеет самую низкую температуру, правый и центр идут по одной кривой с перепадом в 40° по высоте 2,9 м.

На расстоянии 50 см температуры правого края и центр опять сливаются; левый край в нижних зонах по температурам несколько ниже, а вверху выше. Однако с этой стороны на расстоянии 50 см температуры еще не окончательно выравниваются по высоте шахты, давая на уровне первой площадки небольшое увеличение.

Вообще относительно температуры окружающего шахту воздуха надо сказать, что сильные колебания наблюдаются лишь в нижней части шахты на 0,5 м над первой площадкой; в более высоких слоях температура воздуха быстро выравнивается и кривые идут почти вертикально вверх. Температуры на расстоянии от шахты в 25 и 50 см, незначительно отличающиеся в нижних слоях, в верхних слоях еще более приближаются друг к другу. Температура воздуха на расстоянии 2 см от шахты, резко отличающаяся (на 70 — 130°) от температуры воздуха на расстоянии 25 и 50 см, вверху также приближается к ней, уменьшая разницу во внутренней части шахты до 20 — 30° , а во внешней — до 8 — 15° на уровне второй площадки.

Из сравнения результатов этих наблюдений с аналогичными наблюдениями, произведенными в 1928 г. проф. Бромлеем на машинах бельгийского типа, видно, что в основном характере распределения температур наблюдается аналогия, а именно затухание температурных колебаний по высоте шахты происходит на расстоянии в 50—60 см от стекла шахты. Температурные перепады по высоте шахты приблизительно одинаковы (около шахты 90 — 100°), но зато более резки для исследуемых в данном случае машин чехословацкого типа.

В бельгийских машинах выравнивание температуры по высоте происходит более постепенно: там на расстоянии 300 см от шахты перепад между верхней и нижней точками составляет 20°, тогда как у изученной чехословацкой перепад на расстоянии 250 мм равен от 20 до 40°. На расстоянии 60 см перепад температур однако больше в бельгийских машинах, чем в чехословацких, где на расстоянии 50 см от шахты температура по высоте совершенно выравнивается.

На основании произведенных температурных наблюдений можно сказать, что на температуру воздуха внутри шахты большое влияние оказывает температура слоя внешнего воздуха толщиной в 50 см.

В этом легко убедиться благодаря явлению переохлаждения левой стороны машины, что вызвано, как видно из рис. 43, более холодным с этой стороны внешним воздухом. В свою очередь этот поток холодного воздуха слева является следствием того, что там находятся окна и наружная дверь.

Отсюда еще раз видно, как велико значение расположения машин в здании по отношению к окнам и дверям, и как важно обращать внимание на расстановку машин в цехе при проектировке.

IV. Выводы исследования

На основе всего проведенного и проанализированного материала можно сделать следующие выводы:

1. При конструировании ванн, предназначенных к выработке широкого листового стекла, нельзя применять узкие перешейки, наличие которых стесняет плавное вытекание потоков стекломассы, собирающейся со всей поверхности варочного бассейна. По случайным причинам может получить преобладание тот или иной частный поток, локализация которого при выходе из протока будет неустойчивой, обуславливая «блуждающий Quellpunkt». При этом трудно рассчитывать на получение широкой полосы однородной стекломассы, подходящей к устью лодочки, что и обусловит при различии вязкости в различных участках щели лодки разнотолщинность ленты. В исследованной ванне с машинами Фурко сечение перешейка составляло всего $\frac{0,12 \cdot 100}{1,5 \cdot 6} = 1,3\%$ от сечения бассейна; на основе сравнительных данных по изучению «Quellpunkt'a» в ваннах типа «Торпедо» следует думать, что этот процент должен быть повышен по крайней мере до 3—5, чтобы обусловить стабильность и однородность выработочного потока, идущего под машины.

2. При компоновке цеха, планировке его и расположении самой печи и канала Фурко с машинами, особенно при чехословацкой системе, следует обращать особое внимание на создание одинаковых по температурной характеристике воздушных «рубашек» вокруг каждой машины, потому что индивидуальное налаживание

каждой отдельной машины при стабильности в тепловом режиме самой стекломассы представляется трудной задачей. Это соображение усугубляется в случае толстых зеркальных стекол, более резко реагирующих на изменение режима южжига.

Отсюда — вывод, что вопросы вентиляции машинного зала Фурко должны быть тщательно продуманы именно под этим углом зрения, причем не следует допускать в эксплуатации машин воздействия случайных, но резких факторов, каковыми являются сквозняки в гутте.

В менее сильной степени это относится и к самому каналу — вместилищу стекломассы, несимметричное охлаждение которого, искажая изотермы в стекле, тем самым может обусловить различие в вязкости по длине ленты и вызвать ее разнотолщинность.

Проф. М. Г. Степаненко

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛА И МАШИН ФУРКО ЧЕХОСЛОВАЦКОЙ СИСТЕМЫ¹ (ЗАВОДА „ВЕЛИКИЙ ОКТЯБРЬ“)

Введение

Целью предпринятой Институтом стекла работы являлось, изучение теплового режима канала и машин Фурко чехословацкой системы. Изучение должно было дать материал для суждения о сравнительной целесообразности ванн Фурко бельгийской и чехословацкой систем в эксплуатации с тем, чтобы использовать результаты изучения при последующей проектировке заводов оконного стекла. Непосредственным же результатом данного исследования должно быть выявление причин ненормальной работы югдельных машин и связи между положением последних и качеством вырабатываемой ленты.

1. Характеристика объекта исследования

Объектом исследования был выбран завод «Великий Октябрь», имеющий ванну с 9 машинами Фурко. Однако, как это будет ясно из дальнейшего, выбор завода оказался неудачным, ибо отсутствие установившегося режима на всех машинах и постоянные перебои в производстве не позволяли при исследовании получить во всех случаях методологически ясную картину.

Работа усложнялась тем, что вопрос параллельного изучения и сравнения бельгийской системы к настоящему времени в нашей и иностранной литературе не был еще достаточно полностью освещен, исследования же, проведенные ЛОТИ на ваннах системы Фурко по бельгийскому способу (заводов оконного стекла Гусь-Хрустального, им. Дзержинского и Белобычковского), по объему и характеру своих данных, к сожалению, исключили возможность такого сравнения, а работы на Константиновском заводе проф. Бромлея, Шарашкина и автора обнимали собой лишь некоторые стороны теплового режима шахты Фурко.

Таким образом в дальнейшем необходимо детально проведенное изучение оптимального режима типичной установки Фурко

¹ Работа проведена бригадой ГЭИС в составе инж. Н. С. Соколова, М. В. Болтунова и В. И. Шахурина

(на 10—11 машин), чтобы при дальнейшем строительстве этих заводов совершенно ясно представлять теплотехнические характеристики обеих систем.

II. Программы и методика работ

План работ предусматривал два основных этапа: изучение канала Фурко, начиная от основания «крестов» и кончая предмашинными камерами, и изучение машин Фурко — шахты, подмашинной камеры и прилегающих к ним предмашинных камер. В каждом указанном этапе изучению подвергались как газовая зона, играющая роль носителя и передатчика тепла, так и стекломасса, являющаяся объектом тепловой обработки.

В основу температурных методов изучения была положена новая оригинальная аппаратура, сконструированная проф. В. Э. Бромлей, дающая возможность изучить распределение температур не только в газовом пространстве, но и в самой стекломассе. Последнее обстоятельство является весьма ценным, так как изотермический график движущейся стекломассы дает ключ к разрешению ряда технологических вопросов варки стекла, определяя время процесса и качество фабриката.

Поскольку не представлялась возможной одновременная фиксация термической характеристики всех 9 машин, приходилось следить и учитывать основные контрольные показатели (температуры в варочном и рафинажном бассейнах, количество засыпаемой шихты, расход топлива и т. д.). Однако нужно оговориться, что постоянные перебои в производстве и невозможность длительной стабилизации условий выработки на отдельных машинах в разное время не позволили по данной работе дать более широкие обобщения. Поэтому выводы данного исследования сопровождаются рядом оговорок, вытекающих из условий производства в период исследований.

III. Исследование канала Фурко

Исследование канала Фурко включает в себя глубинный пирометраж стекломассы и температурное изучение газового пространства самого канала, «крестов» и предмашинных камер.

Глубинный пирометраж стекломассы в различных частях канала Фурко производился специальным глубинным пирометром системы проф. В. Э. Бромлея, подробное описание которого приведено в работе Ин-та по глубинному пирометражу ванны Ухановского стеклозавода¹. На рис. 1 приведена фотография этого прибора, позволяющего согласно своему очертанию измерять т-ру стекломассы на глубину до 4,0 м при расстояниях этой точки в 2 м от наружной поверхности стены печи.

В пирометр закладывалась платинородиевая термopара ($\varphi =$

¹ Проф. М. Г. Степаненко и инж. М. И. Губин. Глубинный пирометраж стекловаренных печей.

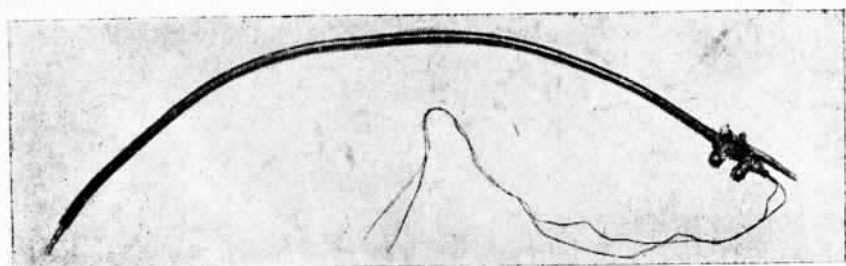


Рис. 1. Общий вид пирометра В. Э. Бромлея для глубинного пирометража.

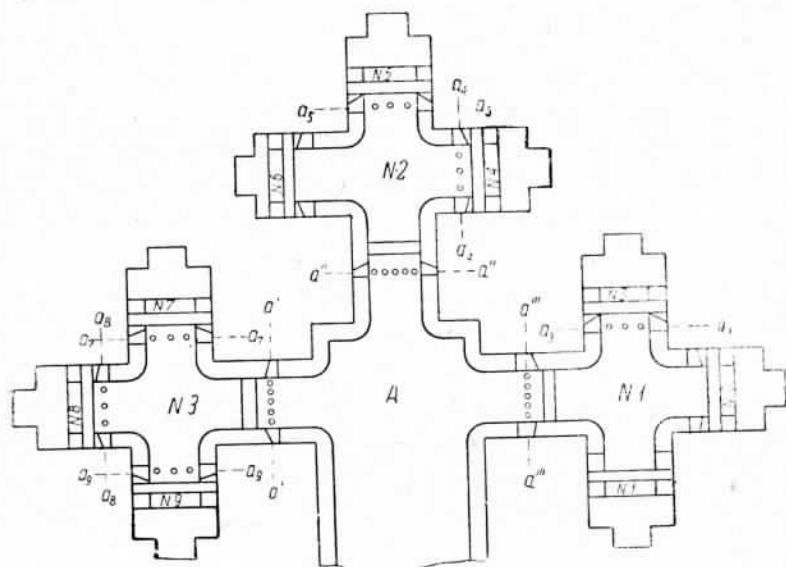


Рис. 2. Схема расположений сечений и вертикалей глубинного пирометража канала.

$\approx 0,5 \text{ мм}$) длиной 300 мм, так что холодный спай ее находился в самой трубе. К гальванометру приключались компенсационные провода, выходящие из прибора. Для правильного действия пирометра необходимо давление циркулирующей воды не менее 2—3 ат.

Учитывая, что по характеру производственных условий пришлось сконцентрировать внимание и детально изучить один из «крестов» канала Фурко с машинами № 7, 8 и 9, — сечения, по которым производилось изучение распределения температур на глубине, были намечены в количестве 9 с таким расчетом, чтобы по результатам измерений можно было судить о тепловом режиме отдельных «крестов». На рис. 2 приведена схема расположения сечений и отдельных вертикалей в них, по которым производился температурный зондаж.

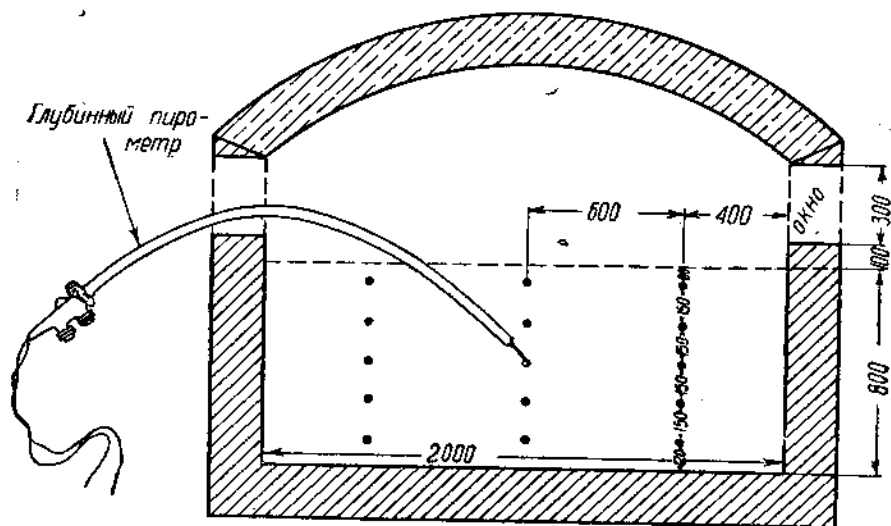


Рис. 3. Расположение точек измерения в сечении предмашинных камер.

Ориентировка мест обуславливалась местонахождением боковых окон, через которые можно было ввести прибор внутрь. Как видно из схемы (рис. 2), в центральной части канала A_1 , к которой примыкают все три креста, выбраны три плоскости ($a'a'$, $a''a''$, $a'''a'''$) на расстоянии 1000 мм от мостов. В каждом сечении намечено 5 вертикалей, находящихся друг от друга на расстоянии 0,4 м, а от вертикальных стен канала — 0,2 м. На каждой вертикали были намечены 5 точек на соответственном расстоянии от поверхности стекломассы: 80 мм — 230 мм — 330 мм — 530 мм — 680 мм; последняя точка отстояла от дна на 120 мм (рис. 3). Таким образом в каждом указанном сечении стекломассы площадью $2 \times 0,8 = 1,6 \text{ м}^2$ выбрано $5 \times 5 = 25$ точек, т. е. 1-я точка на $0,06 \text{ м}^2$, что дает достаточно густую температурную решетку для суждения о потоках стекломассы, вызываемых различием в температурах. В пределах каждого креста количество изученных сечений было различным: в кресте машин № 1, 2, 3 — 1 плоскость (у машины № 3), в кресте машин № 4, 5, 6 — 2 плоскости (у машин № 4 и 5) и наконец в кресте машин № 7, 8, 9 — 3 плоскости (у каждой машины). Таким образом при минимуме числа сечений их расположение позволяло судить о симметричности потоков, обслуживающих боковые кресты, констатировать разницу между юсевым потоком и боковым (машин № 4 и 5) и наконец полную пространственную сетку по целому кресту (машин № 7, 8, 9). Сечение каждого креста, находящееся в предмашинной камере, содержало 3 вертикали, расположенные по центру юси канала и по бокам на расстоянии 0,4 м от стены; по высоте здесь фиксировались те же 5 точек. Плотность точек в сечениях канала самих крестов соответствовала 1-й точке на $\frac{0,8 \cdot 2}{3 \cdot 15} = 0,1 \text{ м}^2$. Расположение точек к предма-

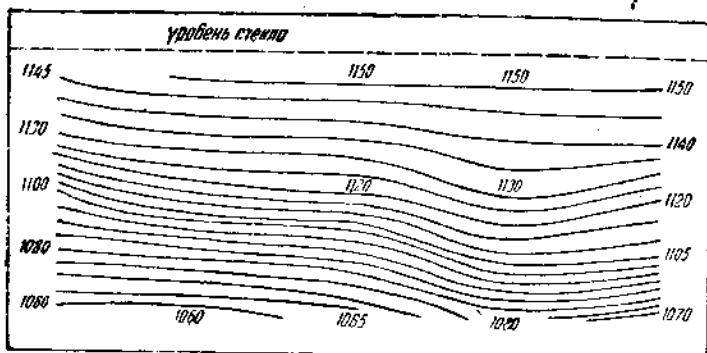


Рис. 4. Изотермы в стекломассе по сечению $a''' a'''$.

шинных камерах и рабочее положение глубинного пирометра даны на рис. 3.

Таким образом всего по глубинному пирометражу было изучено 9 сечений, определивших 165 точек, положение которых является характерным для теплового режима канала и доступным к измерению при помощи аппарата проф. Бромлея.

При измерении глубинных температур установка прибора производилась по системе линеек, дававших возможность определить координаты точек измерения в стекломассе. Инерция прибора требовала выдержки в течение $1\frac{1}{2}$ мин., пока гальванометр не устанавливался на определенное показание. Приводимые далее цифры являются средними из нескольких измерений, причем каждое из них записывалось дважды — при опускании и при поднимании прибора.

Результаты измерения по отдельным плоскостям приводим ниже.

1. Глубинный пирометраж перешейков

а) Вертикальное сечение $a''' a'''$ — у перешейка к машинам № 1, 2, 3, как показано на рис. 3.

Распределение температур по всему сечению является довольно равномерным, и изотермы имеют вид параллельных, почти горизонтальных линий. Правый нижний угол более нагрет, что является естественным следствием подхода по кратчайшему пути горячего потока стекломассы из рафинажного бассейна. Следует отметить, что эта особенность касается глубинных потоков, не могущих обмениваться теплом с газовой средой.

Падение температуры по глубине здесь также приблизительно равномерно, что видно по рис. 5.

Как и следовало ожидать, наименьшее падение получается у второй вертикали справа налево, т. е. как раз там, где проходит (заворачивает) горячий поток из рафинажной части. Далее, отличается от остальных крайняя левая вертикаль, у которой паде-

ние температур на глубине 0,5 м замедляется. На табл. 1 приведены удельные величины падений на различных глубинах.

Таблица 1

Удельное падение температур по глубине сечения (θ °/см)

Вертикали	На глубине				В среднем в толще 80—680 мм
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
Прав.	0,7	1,3	1,0	2,3	1,32
Средн. правая	0,7	0,7	1,3	2,0	1,18
Средняя	1,0	1,0	2,0	1,7	1,42
Средн. левая	1,0	6,3	1,9	1,8	1,50
Левая	1,7	2,0	1,3	1,3	1,58
В среднем по зонам	1,02	1,26	1,50	1,76	1,40

Отсюда видно, что действительно средняя правая вертикаль даст наименьшее падение, а левая — наибольшее, что и объясняется картиной погоков, при условии, что в данном кресте работала машина № 2. По горизонтальным зонам наблюдается прогрессирующее падение — минимальное у поверхности, благодаря лучшим условиям теплопередачи жидкого стекла (луче-прозрачность), и максимальное — у дна, в малотеплопроводимых слоях, у холодного пода.

б) Вертикальное сечение a'' a'' — у среднего креста с машин № 4, 5, 6. Здесь распределение изотерм значительно более капризное. В то время, как температуры у стен (глубже 0,5 м) и у дна с обеих сторон почти одинаковы, в верхних слоях замечается значительная разница. От центра влево температуры выше на 40—30° относительно соответствующих точек правой стороны. В то же время и величины падения температур по отдельным вертикалям сильно разнятся друг от друга. Изотермы левой стороны раздвинуты, иллюстрируя малое падение температур; очевидно здесь шел основной горячий поток в средний крест. На рис. 6 даны изотермы рассматриваемого сечения.

Падение температур по глубине в различных вертикалях дано на рис. 7, из которого видно, что максимальное падение наблюдается по левой вертикали, а минимальное — по правой, что и подтверждает концентрацию горячих теплопроводимых потоков на левой стороне канала.

Закономерности здесь обнаружить не удастся, потому что наклон кривых разный по различным вертикалям и зонам. В этом случае лучше руководствоваться величинами удельных падений по рассматриваемому сечению, представленных в табл. 2.

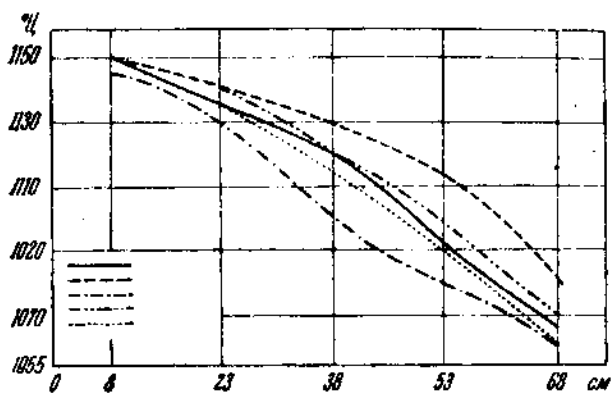


Рис. 5. Падение температуры по глубине перешейка I (сечение $\alpha''' \alpha'''$).

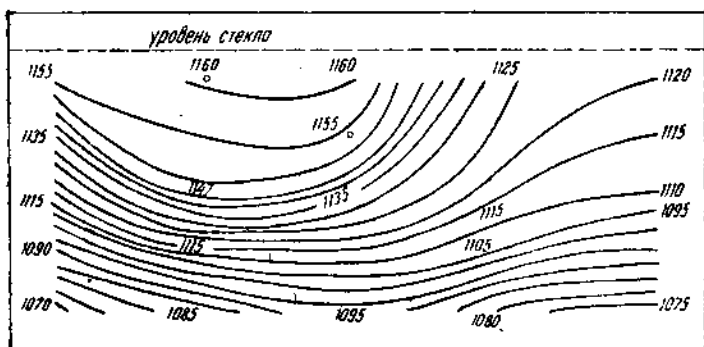


Рис. 6. Изотермы в стекломассе по сечению $\alpha''' \alpha'''$.

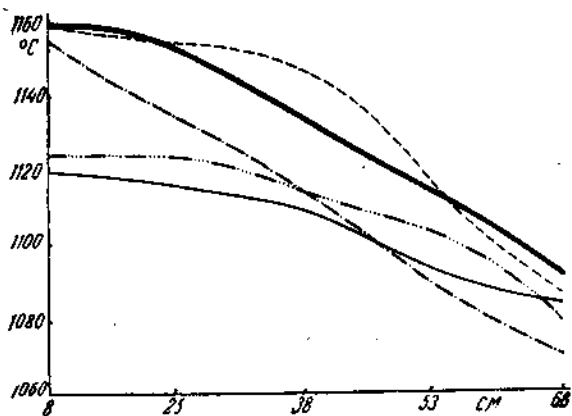


Рис. 7. Падение температуры по глубине перешейка II (сечение $\alpha''' \alpha'''$).

Таблица 2

Удельное падение температур по глубине сечения (в °/см)

Вертикали	На глубине				В среднем в толще 80—680 мм
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
Правая	0,3	0,3	1,0	1,3	0,72
Средняя правая	0,0	0,7	0,7	1,7	0,76
Средняя	0,3	1,3	1,3	1,3	1,05
Средняя левая	0,3	0,5	2,1	2,0	1,23
Левая	1,3	1,3	1,7	1,3	1,40
В среднем по зонам	0,44	0,82	1,36	1,52	1,04

Из табл. 2 видно, что падение закономерно увеличивается справа налево, давая удвоенную величину на левой вертикали. В то же время по зонам наблюдается та же картина: по мере углубления падение также увеличивается, что является общим признаком с сечением у правого креста ($a'' a''$). Нулевое падение (средняя и правая вертикали на глубине 80—230 мм) следует приписать частично влиянию инерции прибора; при перемещении дуги аппарата вместе с фарфоровой трубкой термопары был увлечен и слой горячей стекломассы, перегревавшей на нижних горизонтах спай термопары. Однако это обстоятельство (нулевое падение) общей картины распределения изотерм нарушить не могли.

в) Вертикальное сечение $a' a'$ у левого креста с машинами № 7, 8, 9 дает наиболее любопытную картину. Изотермы в сечении расположены симметрично относительно осевой линии (рис. 3), но абсолютные значения температур на разных вертикалях и на одном и том же горизонте являются различными. Максимум температур по средней линии 1155°; к сторонам температура почти равномерно падает до 1140° (горизонт 1-й). Такое температурное распределение продолжается на глубину до 3-го горизонта, ниже которого изотермы почти горизонтальны. Этот крест с 3 машинами являлся наиболее благополучным за время исследования, в нем работали все три машины, и это обстоятельство обусловило мощный, равномерно распределенный по сечению канала поток стекломассы.

Из сравнения изотермы сечения $a' a'$ и $a''' a'''$ видно, что по абсолютным значениям температур центральный поток в сечении $a' a'$ был горячее, чем в сечении $a''' a'''$, но общее сечение активной струи оказалось скорее меньшим, несмотря на большую производительность левого креста. Отсюда следует, что скорость поверхностных (выработочных) потоков в обоих случаях различна, на что в литературе имеются аналогичные указания (Штумм).

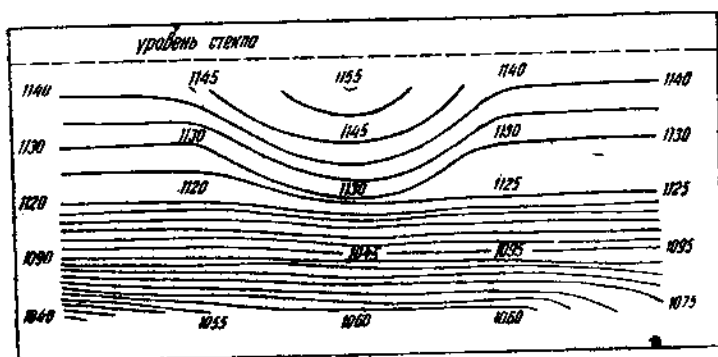


Рис. 8. Изотермы в стекломассе по сечению $a' a'$.

Падение температуры по глубине представлено на рис. 9. Из рисунка видно, что максимум перепада наблюдается на крайней левой вертикали, минимум — на средней правой. Сравнение с симметричным правым крестом обнаруживает, что перепады температур в симметричных — относительно движения стекломассы — плоскостях или вертикалях не являются равными, на что указывает картина изотерм по всем трем крестам (см. ниже), а объяснение этого явления кроется в двух причинах: неравная выработка и различие во внешних (тепловых) условиях.

Удельные падения температур в рассматриваемом сечении приведены в табл. 3.

Таблица 3
Удельное падение температур по глубине сечения (в $^{\circ}/\text{см}$)

Вертикали	На глубине				В среднем в толще 80—680 мм
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
Правая	0,7	0,3	2,0	1,3	1,08
Средняя правая	0,7	0,3	2,0	2,3	1,33
Средняя	0,7	1,0	2,3	2,3	1,58
Средняя левая	1,0	0,7	2,0	2,3	1,50
Левая	0,7	0,7	2,0	3,3	1,63
В среднем по зонам	0,78	0,60	2,06	2,3	1,43

Здесь так же, как и по сечению $a'' a''$, падение закономерно растет справа налево, однако интенсивность падения значительно и приближается к характеристике сечения $a''' a'''$, оставаясь все же большей.

По отдельным зонам картина иная: на глубине 0,23—0,33 м перепад уменьшается (очевидно влияние наличия быстрого по-

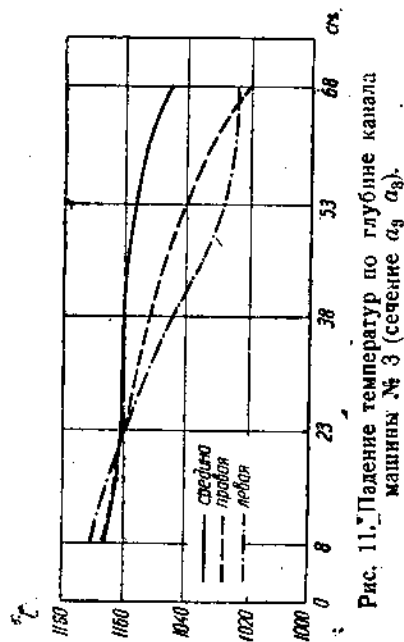


Рис. 11. Падение температур по глубине канала машины № 3 (сечение a_3).

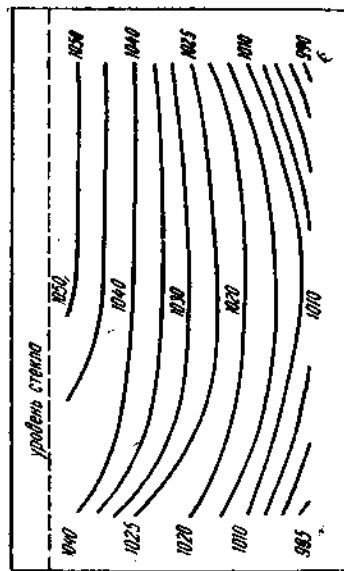


Рис. 12. Изотермы в стекломассе предмашинной камеры № 4 (сечение a_1).

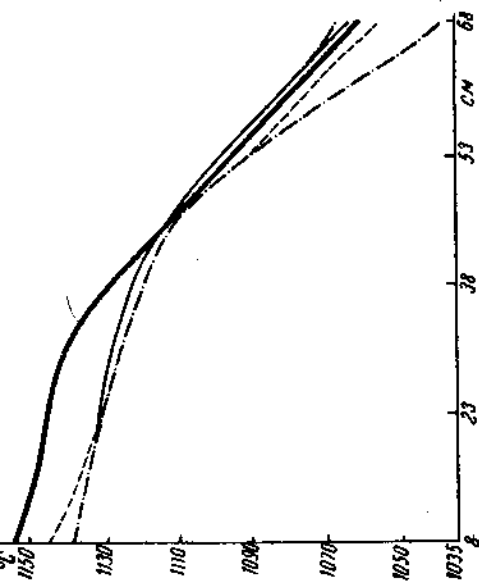


Рис. 9. Падение температуры по глубине перешейка III (сечение $a'3$).

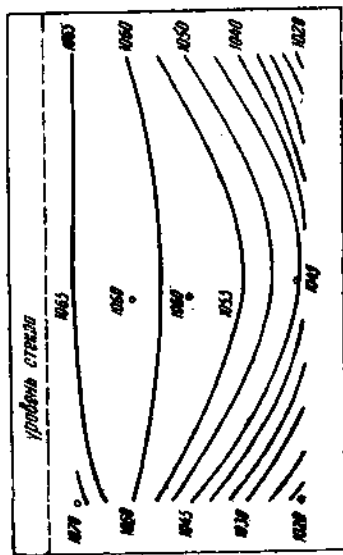


Рис. 10. Изотермы в стекломассе предмашинной камеры № 3 (сечение a_3).

тока на этой глубине); далее перепад резко возрастает, увеличиваясь с приближением ко дну; следует отметить значительную разницу в перепадах на этой же глубине в симметричном сечении $a'' a''$.

2. Глубинный пирометраж предмашинных камер

Этот этап удалось провести лишь в отношении 6 машин, ибо остальные (№ 1, 2, 6) работали крайне нерегулярно. Таким образом в 1-м кресте (справа) был проведен глубинный пирометраж одной предмашинной камеры (у машины № 3), в кресте 2 — двух камер (машины № 4, 5) и в кресте 3 — трех камер (машины № 7, 8, 9).

а) Сечение $a_3 a_3$. Изотермы дают симметричный относительно средней оси рисунок. Температуры по первому горизонту почти равны (1070° — 1065° — 1065°), причем в центре температура на глубину в 0,6 м падает всего на 20° , а по краям — на 45° — 50° .

Вытекающая из предыдущего диаграмма падений температур по глубине дана на рис. 11.

Максимальное расхождение в падении температур средней вертикали и боковой приходится на наиболее глубокие слои, что следует объяснить интенсивным охлаждением боковых стен канала.

Таблица 4

Удельное падение температур по глубине сечения $a_3 a_3$ (в $^\circ/\text{см}$)

Вертикали	На глубине				В среднем в толще 80—680 мм
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
Правая	0,3	0,7	0,7	1,3	0,75
Средняя	0,3	0,0	0,3	0,7	0,43
Левая	0,7	1,0	1,0	0,7	0,82
В среднем по зонам	0,43	0,57	0,67	0,90	0,67

б) Сечение $a_4 a_4$. В этом сечении изотермы (рис. 12) не дают боковой симметрии и обнаруживают перегрев правой стороны, которая находится внутри системы крестов и труднее охлаждается. Кроме того поток стекломассы поступает в эту камеру справа. По абсолютным значениям температур стекломасса здесь холоднее, чем в кресте 1 и у машины № 5. Глубже 0,4 м симметрия температур восстанавливается.

Максимум падения — на правой вертикали, но в общем все три кривых рис. 13 идут одним пучком. Ясно видно замедленное падение в центре канала (средняя вертикаль).

На табл. 5 приведены удельные падения в рассматриваемом сечении.

Таблица 5

Удельное падение температур по глубине сечения $a_1 a_4$ (в $^{\circ}\text{C}/\text{см}$)

Вертикали	На глубине				В среднем в толще 80—680 мм
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
Правая	0,7	1,0	1,0	1,3	1,0
Средняя	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Левая	1,0	0,3	0,7	1,0	0,75
В среднем по зонам . . .	0,80	0,67	0,80	1,0	0,82

Максимальное удельное падение наблюдается на правой вертикали, где стекломасса сильнее охлаждается. По зонам замечается замедленное падение на глубине 0,25—0,4 м, ниже которой падение опять возрастает, т.е. здесь наиболее активный поток.

в) Сечение $a_5 a_5$. Изотермы данного сечения (рис. 14) дают отличную от прежних картину, по характеру несколько напоминающую рис. 9 (сечение $a' a'$). Однако здесь резче выражена боковая симметрия, а частота изотерм по средней вертикали указывает на значительную мощность активного потока. В то время как температуры по верхнему горизонту такие же, как в сечении $a_4 a_4$, температура придонных слоев значительно выше: 1025° против 1010° .

Ни в одном из уже рассмотренных сечений не наблюдалось такого резкого отличия падений температур средней вертикали относительно боковых (рис. 15), с учетом и того, что абсолютные значения их (температур) здесь мало отличаются от температур сечений $a_3 a_3$ и $a_4 a_4$. Падение по боковым вертикалям осуществляется почти по закону прямой линии — двумя близкими к параллельности кривыми.

Таблица 6

Удельное падение температур по глубине сечения $a_5 a_5$ (в $^{\circ}\text{C}/\text{см}$)

Вертикали	На глубине				В среднем в толще 80—680 мм
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
Правая	0,3	1,0	0,7	1,0	0,75
Средняя	0,3	0,3	0,7	0,3	0,53
Левая	0,7	1,0	1,0	1,3	1,00
В среднем по зонам . . .	0,43	0,76	0,80	0,87	0,76

Наиболее интенсивно падает температура на левой вертикали, очевидно с этой стороны (левая половина цеха) канал омывается охлаждающим воздухом в большей мере, чем справа. По зонам —

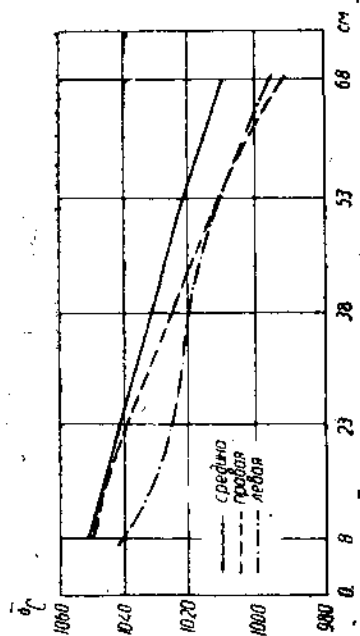


Рис. 13. Падение температур по глубине канала машины № 4 (сечение $a_4 a_4$).

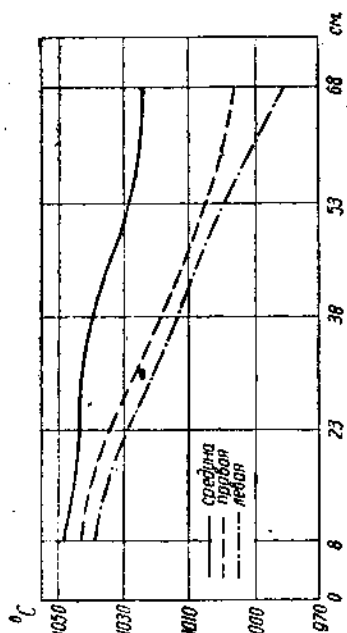


Рис. 15. Падение температур по глубине канала машины № 5 (сечение $a_5 a_5$).

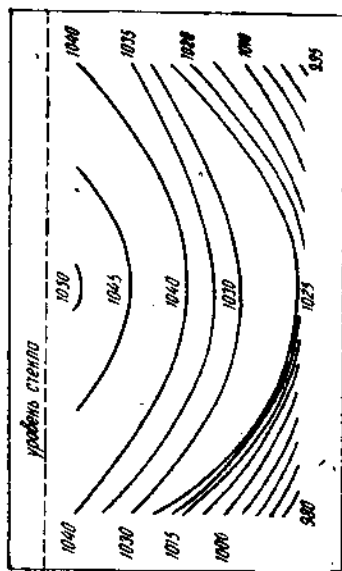


Рис. 14. Изотермы в стекломассе предмашинной камеры № 5 (сечение $a_5 a_5$).

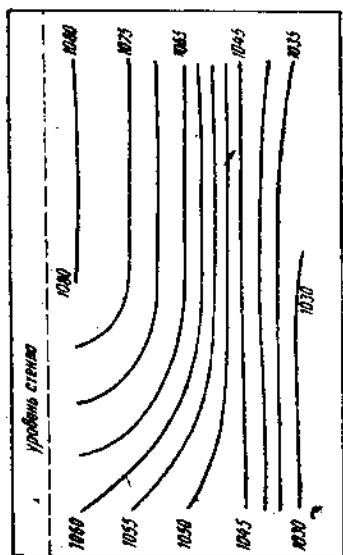


Рис. 16. Изотермы в стекломассе предмашинной камеры № 7 (сечение $a_7 a_7$).

общая закономерность: перепады увеличиваются с глубиной; по отстающим вертикалям наблюдаются исключения местного характера.

г) Сечение $a_7 a_7$. Рисунок изотерм (рис. 16) по характеру весьма напоминает сечение $a_4 a_4$ с той же асимметрией, юбязанной входу потока стекломассы справа: на правой вертикали все температуры до самого дна выше, чем на левой.

Кривые падения (рис. 17) резко различаются: левая вертикаль с меньшими температурами дает очень пологую кривую, в то время как центр и правая вертикаль сливаются до глубины 0,63 м. На этой глубине все три правых кривых собираются в общий пучок. Обращает на себя внимание высокое значение температуры по сравнению с предыдущими подмашинными камерами. В табл. 7 приведены величины удельных падений в сечении $a_7 a_7$.

Таблица 7

Удельное падение температур на глубине сечения $a_7 a_7$ (в °/см)

Вертикали	На глубине				В среднем в толще 80—680 мм
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
Правая	0,3	0,7	1,3	0,7	0,75
Средняя	0,3	0,7	1,3	1,0	0,83
Левая	0,3	0,3	0,3	1,0	0,48
В среднем по зонам	0,3	0,57	0,86	0,90	0,69

Максимум падения имеет место на правой вертикали, в области которой вступает горячий поток стекломассы (до глубины 0,53). По отдельным зонам падение увеличивается сверху вниз; по глубине 0,5 м уменьшается за счет сравнительно глубоко идущего «производственного» потока.

д) Сечение $a_8 a_8$. Несмотря на то, что эта предмашинная камера расположена симметрично относительно креста 3, рисунок изотерм (рис. 18) несколько неправилен до глубины 0,25 м, ниже которой линии изотерм идут параллельно друг другу и симметрично относительно средней вертикали. Более перегретой оказывается на первом горизонте левая сторона, что является следствием особого направления потока стекломассы (см. далее сечение $a_9 a_9$). Абсолютные значения температур почти те же, что и в сечении $a_7 a_7$, за исключением поверхностного слоя — 0,2 м, который в последнем горячее на 5—10° (сечение $a_7 a_7$ — и ближе к центральному кресту).

Кривые падения температур (рис. 19) идут в виде одного пучка, причем максимум падения дает левая вертикаль. Горизонтальный участок кривых — глубину до 0,33—0,35 — является следствием постоянно возобновляемого активного потока, идущего к машине № 8.

Таблица 8

Удельное падение температур по глубине сечения a_7, a_8 (в °/см)

Вертикали	На глубине				В среднем в толще 80—680 мм
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
Правая	0,0	0,7	1,0	0,7	0,60
Средняя	0,3	0,8	1,0	1,0	0,65
Левая	0,3	1,3	0,7	0,7	0,75
В среднем по зонам	0,2	0,77	0,90	0,80	0,67

Минимум падения наблюдается на правой стороне, максимум — на левой, что обусловлено сдвигом трассы потока стекломассы (в связи с машиной № 9).

По зонам — падение неравномерно и аналогично по размеру падению, наблюдаемому на машине № 7 (сечение a_7, a_7).

е) Сечение a_9, a_9 . По данному сечению имеются 2 диаграммы изотерм — в рабочем и нерабочем состоянии машины № 9 (рис. 20 и 20а). К сожалению, в рабочем состоянии не удалось получить данных по левой вертикали (порча термопары) и поэтому диаграмма дополнена предположительно (пунктиром). Сопоставляя обе диаграммы, обнаруживаем, что вследствие близости машины № 9 к центральному кресту температуры на левой вертикали выше правой. Однако температуры по правой вертикали выше; следует полагать, что асимметрия здесь, проявляющаяся до глубины 0,5 м, не может быть значительной. Естественно, что асимметрия будет более резкой в нерабочем состоянии машины № 9, когда поток стекломассы еще более смещен направо — к машине № 8.

Любопытна сопоставление рис. 20. и 20а. Характер падения температур по левой и средней вертикалям (рис. 21 и 21а) весьма сходен, за исключением начала; по абсолютным значениям температуры в рабочем состоянии соответственно выше таковых же в нерабочем на 25—30°, причем на глубине 0,78 м температуры почти уравниваются.

Таблица 9

Удельное падение температур по глубине сечения (в °/см)

Вертикали	На глубине								В среднем в толще 80—680 мм	
	80—230 мм		230—380 мм		380—530 мм		530—680 мм			
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Левая . . .	0,3	0,3	0,7	1,0	1,3	1,3	1,3	0,7	0,9	0,83
Средняя . .	0,3	0,0	0,3	0,3	1,7	0,8	1,0	1,7	0,83	0,58
Правая . .	1,3	0,0	0,7	0,3	1,3	1,0	1,3	1,3	1,15	0,65
В среднем по зонам .	0,80	0,1	0,50	0,53	1,50	0,83	1,15	0,90	0,99	0,69

Примечание. Первый ряд цифр — при работе маш. № 9 (1), второй — в нерабочем состоянии ее.

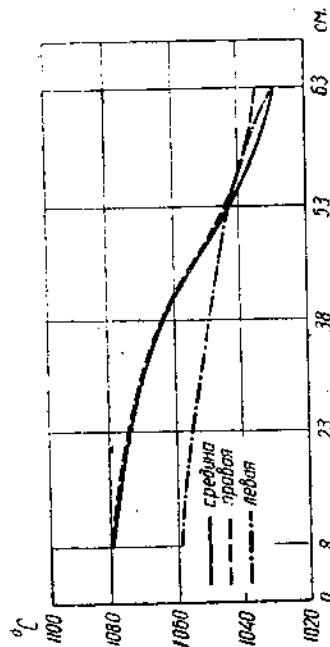


Рис. 17. Падение температур по глубине канала машины № 7 (сечение a_7).

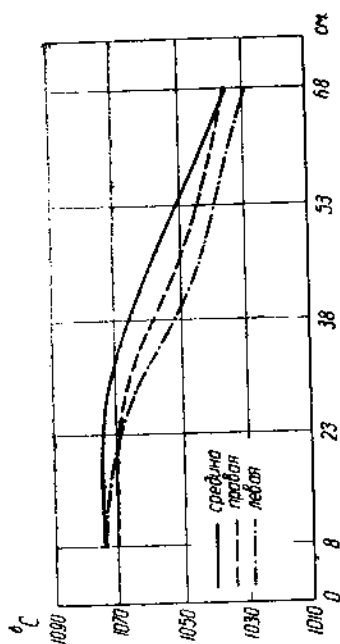


Рис. 19. Падение температуры по глубине канала машины № 8 (сечение a_8).

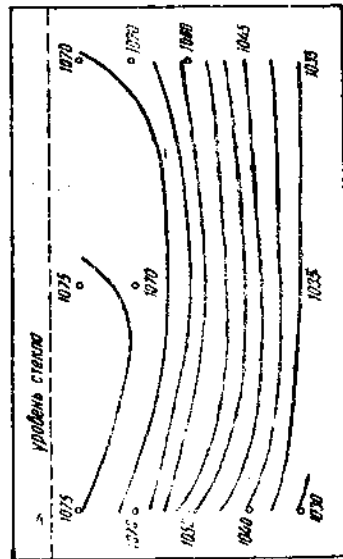


Рис. 18. Изотермы в стекломассе предмашиной камеры № 8 (сечение a_8).

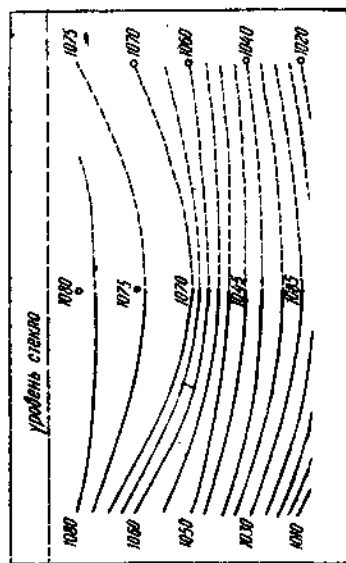


Рис. 20. Изотермы в стекломассе подмашиной камеры № 9 (сечение a_9) (машина работает).

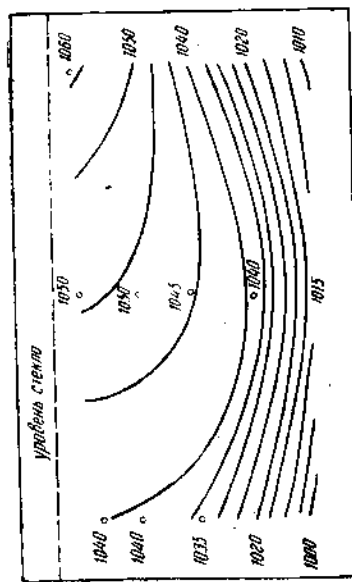


Рис. 20а. Изотермы в стекломассе предмационной камеры № 9 (сечение $a_0 a_0$) (машина работает).

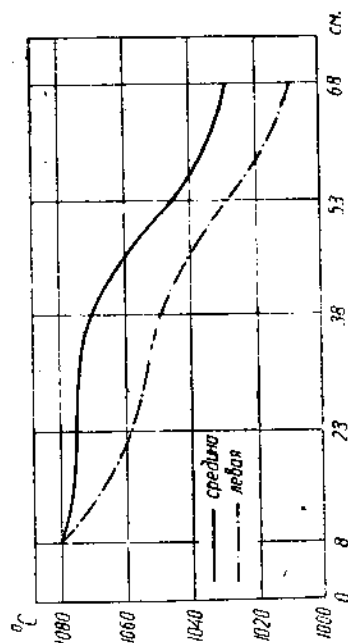


Рис. 21. Падение температуры по глубине канала машины № 9 (сечение a_0 a_0) (машина работает).

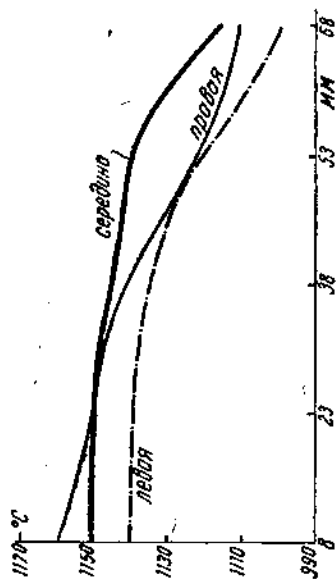


Рис. 21а. Падение температуры по глубине канала машины № 9 (машина в нерабочем состоянии).

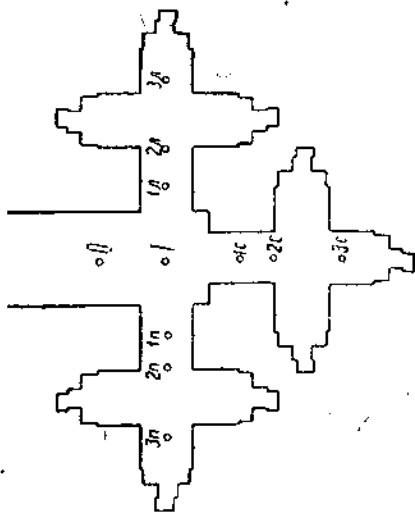


Рис. 22. Схема установки термопар.

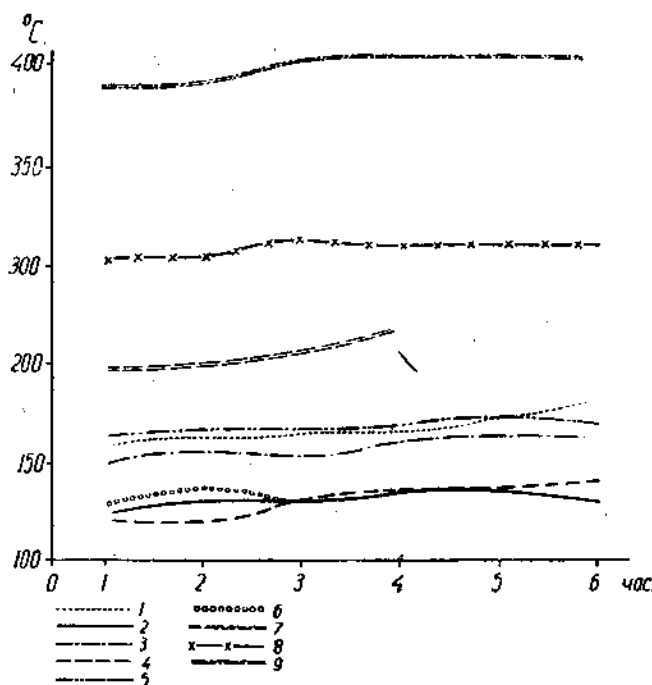


Рис. 23. Изменение температуры газовой среды канала при 6-часовой работе на машинах № 2, 3, 8 и 9.

Как и следовало ожидать, удельное падение при работе машины значительно больше, чем при ее стоянии, когда отсутствует непрерывно возобновляющийся горячий поток стекломассы.

3. Исследование газового пространства

Задачей данного этапа являлось выяснение, во-первых, температурного распределения по газовому пространству и, во-вторых, зависимости теплового режима стекломассы от режима газовой среды. Так как газовое пространство основного креста непосредственно сообщается с печным пространством рафинажного и варочного бассейнов и тепловой режим его связан с тепловым состоянием самой ванны, необходимо было установить ряд контрольных точек измерения температур. Платино-платинородиевые термомпары в обычной фарфоровой армировке пропускались сквозь свод на глубину 0,25 м в точках, показанных на рис. 22.

Термопара 1 в рафинажной части поставлена на расстоянии 4,3 м от экрана. Термопара 2 — в центре основного креста, на расстоянии 6,3 м от термомпары 1. Термомпары 3, 4 и 5 — в разветвлениях креста — на перешейках, на расстоянии 4,9 м от термомпары 2. Термомпары 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 — в пределах каждого креста (внутри) — на расстоянии 1,0 м от оси машины.

Такая система расстановки термопар позволяла выяснить зависимость температуры подмашинной камеры от общего состояния газовой среды канала и связать тепловой режим вытягивания ленты с режимом печи. Фиксация температур по указанным термопарам, а также по новым термопарам шахты, производилась через каждые 3 мин. Температуры холодных спаев термопар корректировались ртутным термометром. При этом измерялась и температура стекломассы в отдельных участках печи — варочной и рафинажной частях ванны, перешейках и в промышленных камерах — 1 раз в час при помощи ардометра.

Результаты наблюдений (при работе 4 машин: № 2, 3, 8 и 9) показали, что при упорядоченной работе колебания показаний температур в 9 наблюдаемых точках не превышали 18—19°, причем максимумы отклонений падали на центральный крест. Температуры за мостами (внутри крестов) оказались более стабильными, за исключением термопары 9, во II перешейке. Обращает на себя внимание сравнительно меньшее колебание температуры в рафинажном бассейне, что, повидимому, обязано присутствию эскрана.

Характер изменений температуры позволяет судить о степени чувствительности температуры газовой среды, обогреваемой стекломассой (рис. 23).

Таблица 10

Средняя температура газовой среды всего канала при 6-часовой работе на машинах № 2, 3, 8 и 9

№ серий наблюдений	Перешеек I		Перешеек II		Перешеек III		Центр. крест	Рафинажный бассейн	Варочный бассейн
	до моста	после моста	до моста	после моста	до моста	после моста			
	1	2	3	4	5	6			
1	1160	1125	1151	1123	1162	1180	1197	1256	1300
2	1163	1130	1158	1121	1165	1136	1197	1256	1300
3	1165	1129	1153	1132	1167	1129	1205	1262	1400
4	1166	1132	1159	1134	1169	1133	1205	1264	1403
5	1173	1136	1164	1134	1172	1134	1215	1260	1402
6	1179	1132	1165	1141	1170	1136	1215	1260	1401
—	19	7	14	20	10	7	18	8	13

Сравнение перепадов температур до и после моста показали, что максимум разницы наблюдается у I перешейка — $1170 - 1130 = 40^\circ$; далее идет III перешеек — $1170 - 1135 = 35^\circ$ и наконец II — $1160 - 1130 = 30^\circ$. Эта разница объясняется большим удалением II перешейка, к которому подходит и более охлажденная стекломасса (1160°).

Изменение температур газовой среды в подмашинных камерах по 4 исследованным машинам (№ 2, 4, 8, 9) иллюстрируется табл. 11.

Таблица 11

Средняя температура газовой среды предмашинных камер

№ серий наблюдений	Перешеек I	Перешеек II	Перешеек III		Примечание
	маш. № 2	маш. № 4	маш. № 8	маш. № 9	
1	1080	1105	1100	1095	Каждая цифра — среднее из суточных наблюдений
2	1080	1105	1102	1097	
3	1082	1105	1101	1096	
4	1080	1105	1100	1098	

Минимальная температура по машине № 2 объясняется близостью машины к наружной двери цеха, что обуславливало заметную разницу в температуре воздуха, обтекающего машины.

Вместе с тем сравнение этих газовых температур с температурой стекломассы (измеренной ардометром) в тех же местах канала показало, что в предмашинной камере № 2 температура стекломассы также отстает — примерно на то же число градусов Цельсия, что видно из табл. 12.

Таблица 12

Температура стекломассы в предмашинных камерах машин

№ серий наблюдений	Перешеек I	Перешеек II	Перешеек III		Примечание
	маш. № 2	маш. № 4	маш. № 8	маш. № 9	
	11074	—	1102	1102	Каждая цифра — среднее из суточных наблюдений
	21076	—	1095	1102	
	31077	—	1095	1100	
	41078	—	1095	1100	
	51077	—	1095	—	

Так как нагревающим телом является стекломасса, то естественно, что перепад температуры в ней больше, чем у газовой зоны: 26—28° против 18—20°.

Вместе с тем наличие такой разницы в режимах машин, неодинаково расположенных относительно наружных конвекционных потоков воздуха, свидетельствует о необходимости принимать во внимание такую сравнительно маловажную деталь в планировке цеха, как местоположение дверей и окон, могущих служить источником холодных сквозняков.

Общую связь средних температур газового пространства за период наблюдений — начиная с варочной части печи и кончая термопарой в предмашинной камере — показывает таблица 13 и рис. 6, из которых видно, что ниже всех температура в предмашинной камере машины № 2.

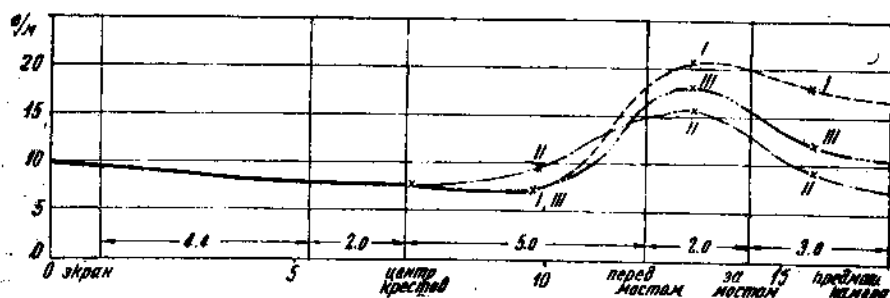


Рис. 25. Удельное падение (по длине) температур газовой среды канала. сравнительная аналогия в характере удельного падения температур: крайние кресты I и III показывают более резкие изменения, чем крест II, идущий вдоль оси печи, в центре здания и частично защищаемый от потери тепла боковыми крестами.

Так как в конечном счете важной является температура самой стекломассы, то интересно проследить ее изменения в различных зонах канала. Как уже указано, температура поверхности стекла измерялась ардометром.

Вопрос о приближении полученных температур к истинным является особым; в данном случае важны лишь их относительные значения.

Данные табл. 14 показывают, что колебания температур за 6 серий наблюдения в одних и тех же точках составляли 3—6° С, т. е. что можно считать температуру стабильной. В различных же участках канала эти изменения оказались следующими:

			Перепад °С	
Перешеек I — 1171°	Предмаш. камера № 1.	1073—1076	— 100	
		№ 2 — 1074—1073	— 100	
		№ 3 — 1090—1091	— 85	
Перешеек II — 1166°	" "	№ 4 — 1091—1097	— 75	
		№ 5 — 1077—1081	— 90	
		№ 6 — 1080—1081	— 90	
Перешеек III — 1160°	" "	№ 7 — 1093—1095	— 70	
		№ 8 — 1095—1100	— 70	
		№ 9 — 1100	— 70	

Таблица 14

Средние температуры стекломассы в канале (перешейках и предмашинных камерах)

№ серий наблюдений	Температура перешейков			Температура предмашинных камер								
	I	II	III	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1171	1167	1166	1073	1074	1090	1095	1080	1080	1095	1095	1100
2	1172	1172	1166	—	1076	—	1093	1078	1090	—	—	—
3	1172	1166	—	—	1077	—	1091	1080	—	—	—	—
4	1175	—	1167	1074	1078	—	1094	1078	—	1093	1096	—
5	1172	—	—	—	1077	1091	1097	1077	1081	1095	1097	—
6	1176	1172	1165	1075	—	—	1095	1081	1080	—	1100	—

Минимальные температуры оказываются опять-таки в кресте I, причем наиболее резко обнаруживается на машинах № 1 и 2, обдуваемых холодным потоком воздуха вследствие часто открываемой двери, ведущей из цеха наружу. Разница температур стекломассы в предмашинных камерах 1, 2 и 3 — 15—17°, в то время как в кресте II разница не превышает 12—13°, а в кресте III — 3—7°. Отсюда следует, что удерживать одинаковый режим вытяжки стекла или выравнить его пораздо легче, чем в кресте III, и значительно труднее в I; крест II занимает промежуточное положение. Уточнение влияния наружных обтекающих потоков воздуха будет приведено ниже. Следует думать, что термостатичность креста III объясняется защитным действием самой печи, создающей термический барьер при перемещении в цехе холодных потоков воздуха (справа налево).

4. Общие выводы по глубинному пирометражу и пирометражу газовой среды

Сопоставление изотерм обеих сред

Приведенные данные позволяют сделать следующие заключения.

1) Удельное падение температур по глубине стекломассы — по всем рассмотренным 9 сечениям — подчиняются одной и той же закономерности.

Таблица 15

Удельное падение температур по отдельным вертикалям (°/см глубины)

Сечения	Вертикали						Примечание
	Правая	Средняя правая	Средняя	Средняя левая	Левая	В среднем	
$a'' a'''$	1,32	1,18	1,42	1,50	1,58	1,40	
$a_2 a_3$	0,75	—	0,43	—	0,82	0,67	
$a'' a''$	0,72	0,76	1,05	1,23	1,40	1,04	
$a_4 a_4$	1,00	—	0,70	—	0,75	0,82	
$a_5 a_5$	0,75	—	0,53	—	1,00	0,76	
$a' a'$	1,08	1,33	1,58	1,50	1,68	1,43	
$a_7 a_7$	0,75	—	0,83	—	0,48	0,69	
$a_8 a_8$	0,60	—	0,65	—	0,75	0,67	
$a_9 a_9$	1,15	—	0,83	—	—	—	
В среднем. .	0,96	1,09	0,89	1,41	0,94	—	

Падения температур по бокам сечения (левая и правая вертикали) весьма разнообразны, так как зависят от условий охлаждения снаружи. Падение температуры в середине — относительно боков — зависит главным образом от работы машин. Вследствие того, что условия работы отдельных крестов были слишком различными, сравнительный анализ является делом трудным. Иная картина представляется при сравнении удельного падения температур по отдельным зонам.

Таблица 16

Удельное падение температур по зонам

Сечения	З о н ы				В среднем
	80—230 мм	230—380 мм	380—530 мм	530—680 мм	
$a''' a'''$	1,02	1,26	1,50	1,76	1,40
$a_3 a_3$	0,43	0,57	0,67	0,90	0,67
$a'' a''$	0,44	0,82	1,36	1,52	1,04
$a_4 a_4$	0,80	0,67	0,80	1,00	0,82
$a_5 a_5$	0,43	0,76	0,80	0,87	0,76
$a' a'$	0,76	0,60	2,06	2,30	1,43
$a_7 a_7$	0,30	0,96	0,96	0,90	0,69
$a_8 a_8$	0,20	0,77	0,90	0,80	0,67
$a_9 a_9$	0,80	0,90	1,50	1,15	0,99
Среднее по сечен. канала.	0,74	0,89	1,64	1,86	1,28
Среднее по сеченн. предмашинн. камер	0,49	0,64	0,94	0,94	0,75
В среднем по всем сечениям	0,62	0,76	1,29	1,40	1,07

Интенсивность падения увеличивается с глубиной, причем это оказывается сильнее у каналов, ведущих к крестам, а не в самих крестах.

В то время как по сечениям каналов ($a'''a'''$, $a''a''$, $a'a'$) падение равномерно возрастает, у предмашинных камер — ниже глубины 0,4—0,5 м — падение приостанавливается. Это свидетельствует о том, что активный поток стекломассы у отдельных машин слабее, занимает меньшую глубину, инертные слои (нижние) более мощны. Верхние, горячие слои стекломассы с температурой 1040—1080° у машин и 1100—1160° у мостов являются теплопрозрачными, почему перепады здесь менее резки.

Вместе с тем перемещение (движение) стекломассы у верхних горизонтов поддерживает температурный потенциал на одинаковом уровне, благодаря чему степень падения температуры может служить мерилом мощности потока и следовательно может быть связана с производительностью как данной машины, так и целого креста.

На рис. 26 приведены данные удельного падения температур в трех сечениях у канала крестов. Наиболее резко температура падает в сечении $a'a'$ — у креста III, где работают три машины (№ 7, 8 и 9). Резкий скачок вниз температура дает на глубине 0,35—0,4 м, ниже которого расположены малотеплопроводящие слои стекломассы. Следующее по степени резкости падения температуры — сечение у креста II, где работали тоже три машины до указанной выше глубины — здесь падение сходно. В глубинных же слоях падение сильно замедленное, что находит себе объяснение в иных температурных значениях этих зон. В то время как сечение $a'a'$ имеет по 5-му горизонту температуру 1040—1070°, сечение $a''a''$ имеет температуру 1080—1095°, т. е. здесь при относительно равных верхних температурах (горизонт 80 м.м. под уровнем) наблюдается значительно более высокий температурный потенциал, что свидетельствует о большой мощности активного потока. Поэтому и перепад по глубине здесь меньший.

Удельное падение по сечению $a''a''$ представляет средний, по положению кривой, случай. Интенсивность падения здесь наименьшая, но значение перепадов по верху — выше рассмотренных, а на глубине оно занимает среднее положение. Диаграмма изотерм (рис. 4) показывает, что плотность кривых здесь по всему сечению почти одинакова; в этом кресте не работала одна из машин (№ 1), а другая давала перебой в работе, так что поток стекломассы в данном сечении являлся наименее мощным.

Дальнейшее уточнение указанного видно из рис. 27, где представлены удельные падения по отдельным машинам. Все помещенные там кривые по их взаимному расположению можно

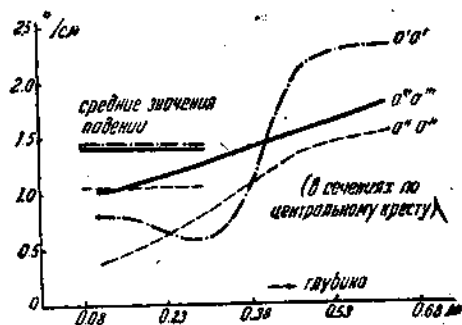


Рис. 26. Удельное падение температур по глубине стекломассы «крестов».

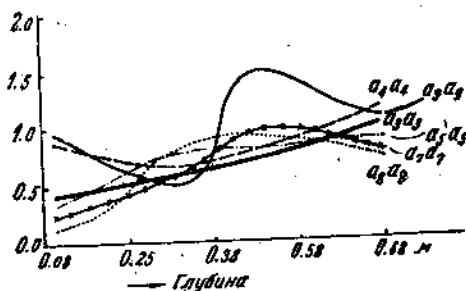


Рис. 27. Изменение удельного падения температур по глубине в сечениях предмашинных камер №3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9.

разбить на 3 участка. Первый участок — до глубины 0,27—0,30 м; здесь величины удельных падений у разных машин имеют довольно значительные различия — от 0,2 до 0,8°/см. Следующий участок — до глубины 0,6 м; здесь все машины, за исключением машины № 9, характеризуются близкими значениями удельных падений; и наконец 3-й участок — до дна, опять-таки с различными удельными падениями температуры для разных машин, причем весь крест III дает пучек исходящих кривых, а остальные 2 креста — восходящие. Диаграммы изотерм (рис. 10, 12, 16 и 18) дают объяснение этому кажущемуся противоречивому явлению: средняя температура 5-го горизонта машин № 3 и 4 — 1028 и 998° и машин № 7 и 8 — 1032 и 1034°, тогда как температуры верхнего горизонта тоже ниже; машины № 3 и 4 — 1068—1047°, машины № 7 и 8 — 1063—1073°, т. е. относительные перепады у более «холодных» сечений растут.

Представляет интерес сравнение температурного распределения у работающей и неработающей машины (№ 9). Кривые пересекаются (или приближаются) по двум горизонтам — 0,3 и 0,7 м, в зонах промежуточной и самой верхней — резкое расхождение за счет появления активного потока (рис. 27).

2) Абсолютные значения температур в различных сечениях зависят от их местоположения, что легко можно видеть из диаграмм изотерм. В сечениях у оснований крестов температуры колеблются:

На глуб.	80 мм	— 1120—1160° ($\Delta = 40^\circ$)
" "	230 "	— 1115—1155° ($\Delta = 40^\circ$)
" "	380 "	— 1100—1147° ($\Delta = 47^\circ$)
" "	530 "	— 1080—1125° ($\Delta = 45^\circ$)
" "	680 "	— 1055—1095° ($\Delta = 40^\circ$)

Оказывается, что во всех трех сечениях колебания температур на всех горизонтах имеют примерно одну и ту же величину — 40—47°. В сечениях предмашинных камер наблюдается примерно то же:

На глуб.	80 мм	— 1040—1080° ($\Delta = 40^\circ$)
" "	230 "	— 1025—1075° ($\Delta = 50^\circ$)
" "	380 "	— 1015—1070° ($\Delta = 55^\circ$)
" "	530 "	— 1000—1055° ($\Delta = 55^\circ$)
" "	680 "	— 980—1045° ($\Delta = 65^\circ$)

Здесь налицо прогрессирующее увеличение разности, которое означает, что для производственного процесса эти разности в более глубоких инертных слоях существенного значения не имеют.

3) Понижение температуры по глубине является различным; беря в среднем понижение по всем вертикалям в отдельных сечениях, получим:

Сечение	a'''	a'''	1150—1060 = 90°
"	a''	a''	1160—1070 = 90°
"	a'	a'	1155—1040 = 115°,

т. е. максимум падения имеет место в кресте III, где работали все три машины.

Сечение	a_3	a_3	$1070-1020=50^\circ$	
"	a_4	a_4	$1050-990=60^\circ$	
"	a_5	a_5	$1050-980=70^\circ$	
"	a_7	a_7	$1080-1030=50^\circ$	
"	a_8	a_8	$1075-1030=45^\circ$	
"	a_9	a_9	$1080-1010=70^\circ$	
"	a_9	a_9	$1060-1000=60^\circ$	(неработающ. машина)

В сечениях предмашинных камер особой закономерности не наблюдается, если сравнение проводить по крайним значениям (по всем вертикалям). Если же идти по средним значениям, то замечается определенное уменьшение абсолютного снижения температур у интенсивно работающих машин, поскольку увеличение мощности потока уменьшает перепад.

4) Сравнение температур газа и стекломассы показывает, что падение их по длине канала совершается параллельно и отражает в различной степени влияния одних и тех же факторов (охлаждение наружным воздухом, согревание более мощным потоком стекломассы). Температура газового пространства падает вместе с температурой стекломассы, т. е. по мере удаления от рафинажного бассейна. Однако разница температур не только прямо пропорциональна расстоянию, но еще и мощности потока стекломассы: вот почему в слабо работающем кресте I перепад температуры больше, чем у интенсивно эксплуатируемого креста III, где действовали все 3 машины.

IV. Исследование теплового режима машин Фурко

Изучение теплового режима машин Фурко включало две задачи: исследование подмашинной камеры и самой шахты машины и преследовало цель установить по возможности связь между распределением температур под машиной и в самой шахте и качеством получающейся ленты.

В качестве объекта исследования были взяты 4 машины, действовавшие в тот период с наименьшими переборами: № 3, 4, 8 и 9.

A. Тепловой режим подмашинной камеры

Методика исследования заключалась в установлении распределения температур в двух вертикальных сечениях камеры, перпендикулярно плоскости ленты стекла (торцовые плоскости). В них намечены 8 точек, из которых 2 центральных фиксируют температуру ленты над «луковицей» на высоте 100 мм от уровня стекломассы (и на высоте 800 мм от уровня, на расстоянии 20 мм от борта). Остальные 6 точек расположены в газовом пространстве камеры; их места и относительное распределение представлены на рис. 28.

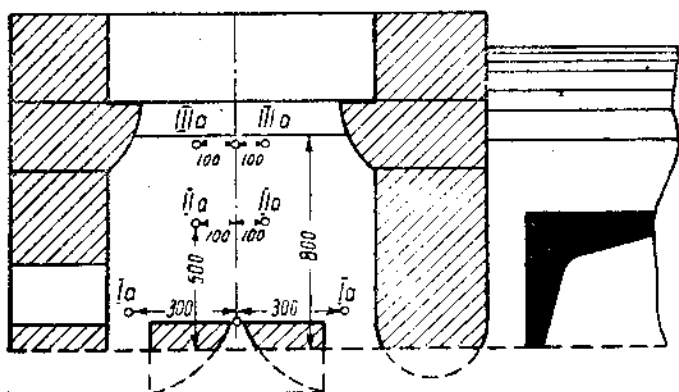


Рис. 28. Расположение точек измерения в подмашинной камере.

Измерение производилось длинными (3 м) и тонкими термопарами (Fe-Const) с голым спаем, приготовленным для измерения температур поверхности твердых тел. Так как канализация водяного охлаждения ленты являлась двухсторонней (вода входила с одной стороны камеры, а выходила с другой), то распределение температур должно было отразить разницу в тепловых состояниях обоих торцов камеры вблизи холодильников. Результаты измерений по всем 8 точкам с обоих торцов камеры даны на табл. 17.

Таблица 17

Распределение температур в торцевых плоскостях подмашинных камер (№ 3, 4, 8 и 9)

Торцовые стороны при входе воды

№ машин	От стекломассы на 100 мм		От стекломассы на 500 мм		От стекломассы на 800 мм		У борта ленты на расст. 10—20 мм	
	Наружн. от ленты стекла на 300 мм	Внутр. от ленты стекла на 300 мм	Наружн. от ленты стекла на 100 мм	Внутр. от ленты стекла на 100 мм	Наружн. от ленты стекла на 100 мм	Внутр. от ленты стекла на 100 мм	У луковины	На 800 мм от луковины (вверх)
4	420	520	490	490	450	485	405	450
3	395	520	450	470	450	470	375	430
9	430	540	465	510	560	510	—	480
8	435	495	480	495	480	495	450	505
В средн.	420	518	471	491	461	490	410	466
Разн.	98°		20°		30°		56°	

Торцевые стороны при выходе воды

4	435	530	500	500	485	510	410	490
3	395	510	450	470	430	450	390	420
9	435	545	465	500	470	510	—	475
8	440	490	475	480	470	485	435	470
В средн.	426	519	473	488	464	489	412	464
Разн.	93°		15°		25°		52°	

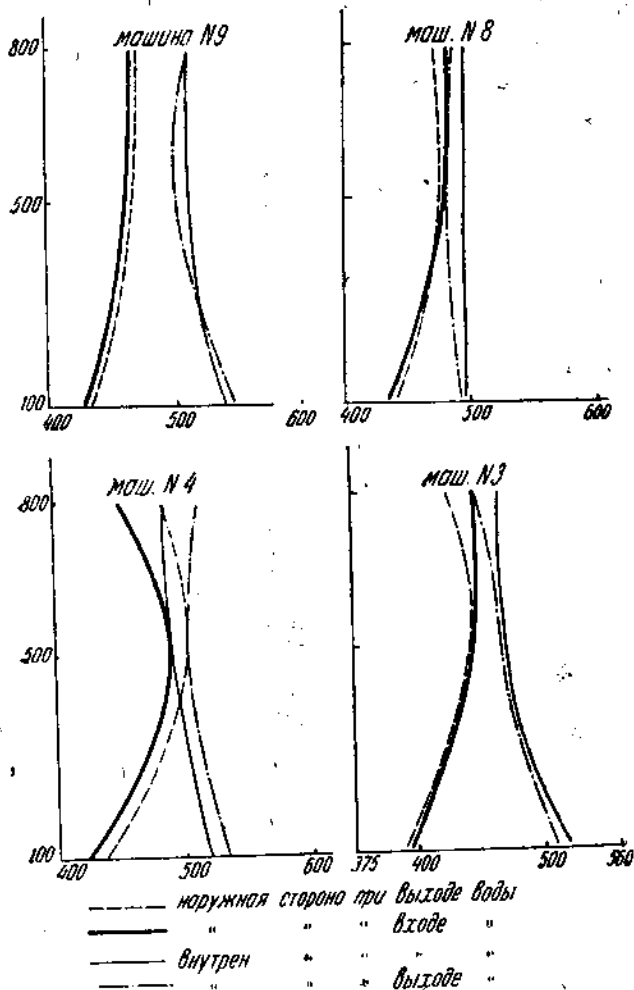


Рис. 29. Измерение температур в торцевых плоскостях подмашинных камер № 3, 4, 8 и 9

На рис. 29 дано графическое изображение изменений температур.

Анализ приведенного графика обнаруживает любопытное явление:

1) На одной и той же высоте от уровня стекломассы, но с разных сторон ленты стекла (что обозначено на рис. 28 сторонами — наружной — к слепому концу канала и внутренней — к кресту, навстречу стекломассе) температуры газового пространства камеры сильно отличаются друг от друга:

- | | |
|----------------------|----------------------|
| а) на высоте 100 мм: | |
| по маш. № 9 — 100° | по маш. № 4 — 100° |
| " " № 8 — 50° | " " № 3 — 120° |
| б) на высоте 500 мм: | |
| по маш. № 9 — 45° | по маш. № 4 — 0° |
| " " № 8 — 15° | " " № 3 — 20° |
| в) на высоте 800 мм: | |
| по маш. № 9 — 45° | по маш. № 4 — 35° |
| " " № 8 — 15° | " " № 3 — 20° |

Иными словами, по мере повышения разницы в температурах сглаживается и становится даже равной 0°.

2) Падение температур резко замедляется на высоте 0,5 м. Как показывают средние цифры, по обоим торцам закономерность эта является общей, причем интересно отметить, что машина № 8 (обновленная) характеризуется минимальным температурным перепадом. Объяснение этих явлений заключается в тепловой роли мостов: мост, обращенный к кресту, более горяч, чем «внешний», что и влечет перегрев (лучеиспусканием) точек измерения.

II и III горизонты (0,5 и 0,8 м) находятся уже в области горячего газового мешка, где температурный перепад значительно меньший. Кроме того, здесь сказывается действие холодильников, поглощающих тепло лучеиспускания.

Из рис. 34 видно, что распределение температур в отдельных торцах мало отличается друг от друга, и следует считать, что в хорошо отрегулированной машине графики должны совпадать. Понижение температуры на высоте 0,8 м машин № 4 и 3 следует приписать конвекционному воздушному потоку, проходящему сквозь неплотности устройства, что рассматривает симметрию рисунка изотерм. Построенные на основе полученных температурных данных графики изотерм представлены на рис. 30а, 30б, 30с.

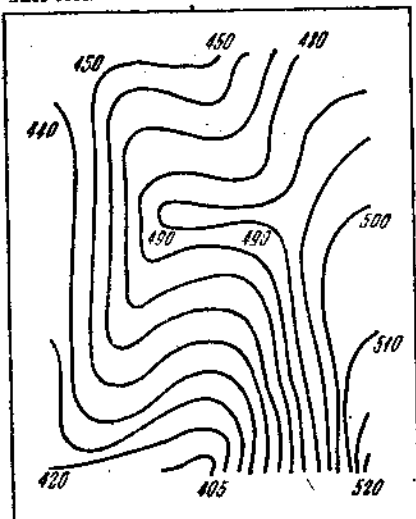
График ясно показывает асимметрию в распределении изотерм и подчеркивает для отдельных машин резкий по высоте перепад температур.

Обобщая сказанное по пирометражу подмашинных камер, можно сделать следующие выводы:

1. Работа холодильников в нормально действующих машинах не должна вызывать резких колебаний температур у противоположных торцов во избежание неравномерного отжига ленты по ширине.

2. Резкий температурный перепад по обоим сторонам ленты, обусловленный различием в температуре мостов, является характерным для чехо-словацкой системы без промежуточных подогревательных камер.

Вход воды



Выход воды

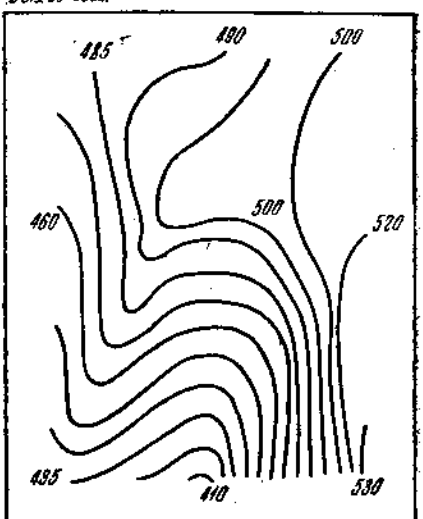
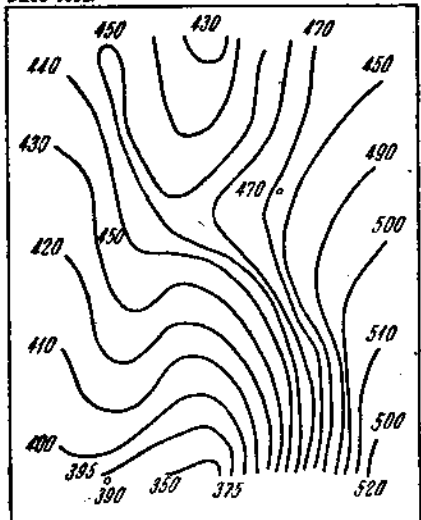


Рис. 30а. Изотермы торцевых сечений подмашинных камер № 4.

Вход воды



Выход воды

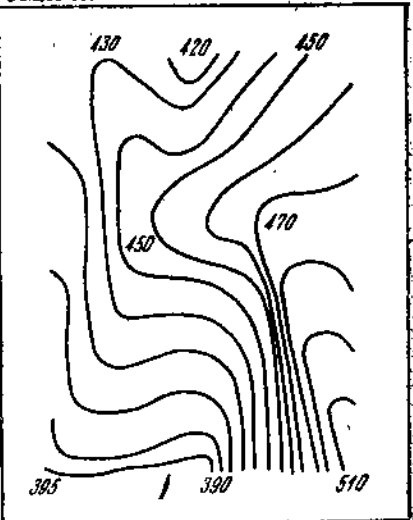
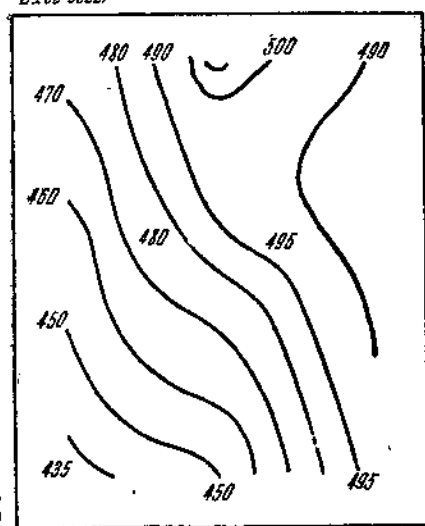


Рис. 30б. Изотермы торцевых сечений подмашинных камер № 3.

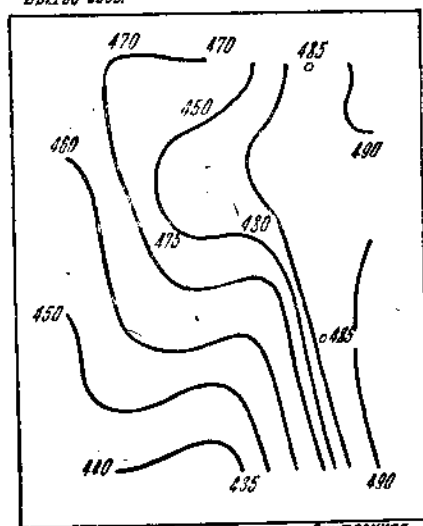
Вход воды



Наружная

Внутренняя

Выход воды



Наружная

Внутренняя

Рис. 30в. Изотермы торцевых сечений подмашинных камер № 8.

3. Наличие мешка горячих газов под сводами камеры уменьшает на высоте 400—500 мм. от уровня стекломассы разницу в температурах, чему способствует и лучепрозрачность стеклянной ленты; ниже верхнего края холодильников это обстоятельство уже не имеет места.

4. При помощи регулирования притока воды в холодильниках (справа и слева) можно эту неравномерность значительно смягчить. Подсчет количества тепла, уносимого водой, исчисленный для приводимых случаев, показал, что у машины № 3, где разницы температур слева и справа оказались наименьшими (см. рис. 34), т. е. равными 50°, «нужный» холодильник пропустил с водой на 9% меньше тепла, чем «внутренний», обращенный к горячему мосту, в то время как у машины № 3 разница составила всего лишь 2,5%, а № 4 — 3,5% (см. табл. 18).

Таблица 18

Характер работы холодильников машин № 3, 4, 8 и 9

№ машин	Температура входящей воды	Температура выходящей воды из холодильника		Скорость прохождения 10 л воды через холодильник		Количество проходящей воды через холод. в 1 ч.		Количество отдачи калорий		Примечание
		Наружн. сторона	Сторона от канала	Наружн. сторона	Сторона от канала	Наружн. сторона	Сторона от канала	Наружн. сторона	Сторона от канала	
4	13	58	48	57	42	630	858	29350	30030	
3	12	58	41	60	37	600	972	27300	28288	
8	12	53	44	41	30	876	1200	35916	38400	
9	12	49	41	42	31	858	1158	31746	33582	

5. Во избежание неравномерного по ширине охлаждения ленты и нарушения режима отжига следует всячески гарантировать плотность конструкции шахты и держать подмашинную камеру по возможности закрытой, не допуская просасывания воздуха.

Б. Тепловой режим шахт машин Фурко

Задачей изучения теплового режима шахт является установление зависимости между качеством получаемых изделий и процессом отжига, а также связь между конструкцией машин (мест) и распределение температур в пространстве отжига. Вместе с тем надо было выяснить и ряд побочных вопросов, связанных с расположением машин в цехе с точки зрения влияния наружных воздушных потоков на режим внутри шахты.

1. Методика исследования

Методика исследования заключалась в исследовании температурного распределения в газовом пространстве, окружающем ленту и машины, а также температуры самой ленты и шахты. В связи с особенностью измеряемой среды и условий измерения были применены различные системы комплексных термопар (Fe-Const).

Пирометраж газовой среды шахт производился двумя симметрично расположенными с обеих сторон ленты системами термопар по 15 шт. в каждой. Для этого в продольных стенах шахты просверливались отверстия по 3 в ряд на 5 горизонтах. В каждом ряду термопары вставлялись на расстоянии 0,3 от краев и в центре. Ряды находились на высоте: 1200, 1750, 2350, 2950 и 3550 мм от уровня лодочек. Горячий спай термопар распола-

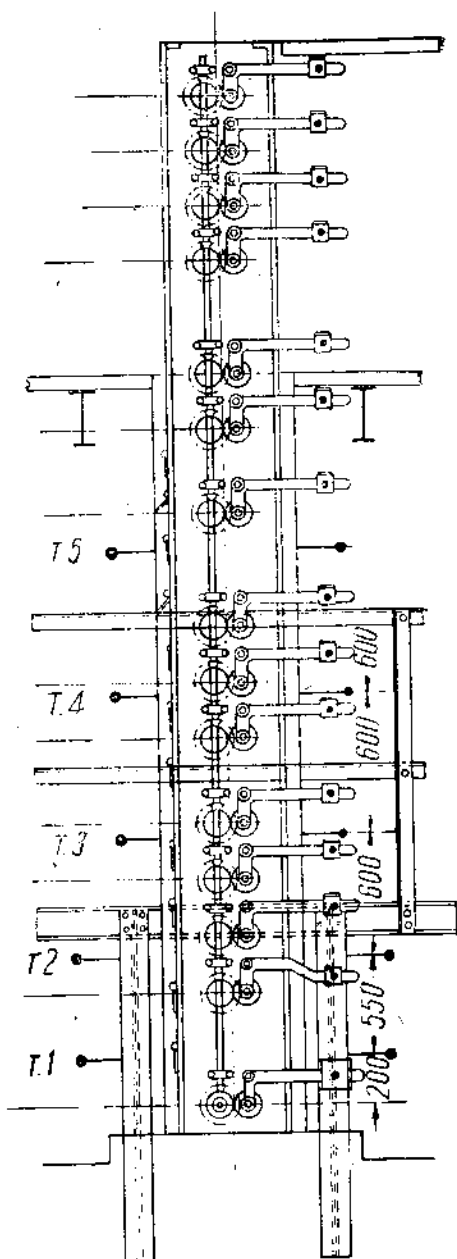


Рис. 31. Вертикальный разрез шахты с обозначением места ввода термопар.

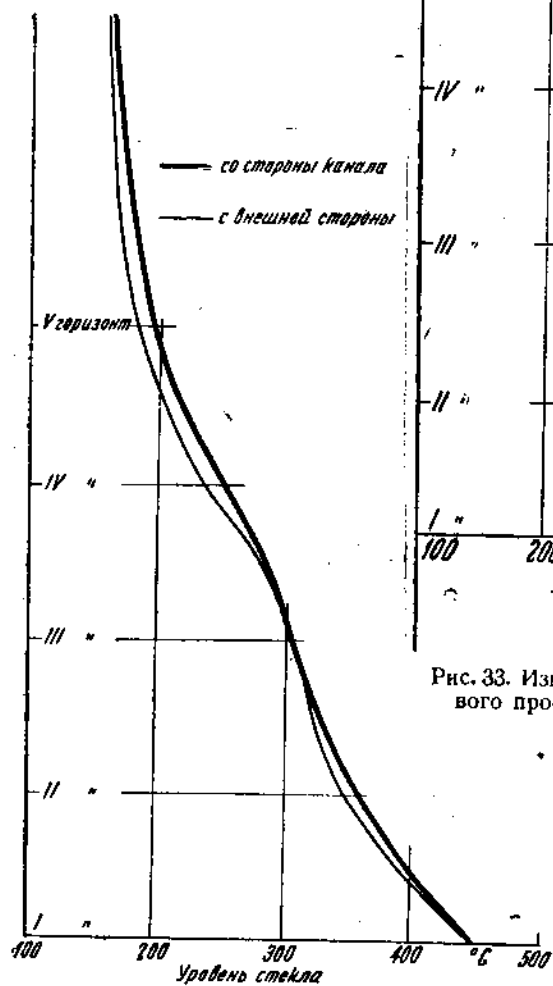


Рис. 32. Изменение средней температуры газового пространства шахты машины № 3.

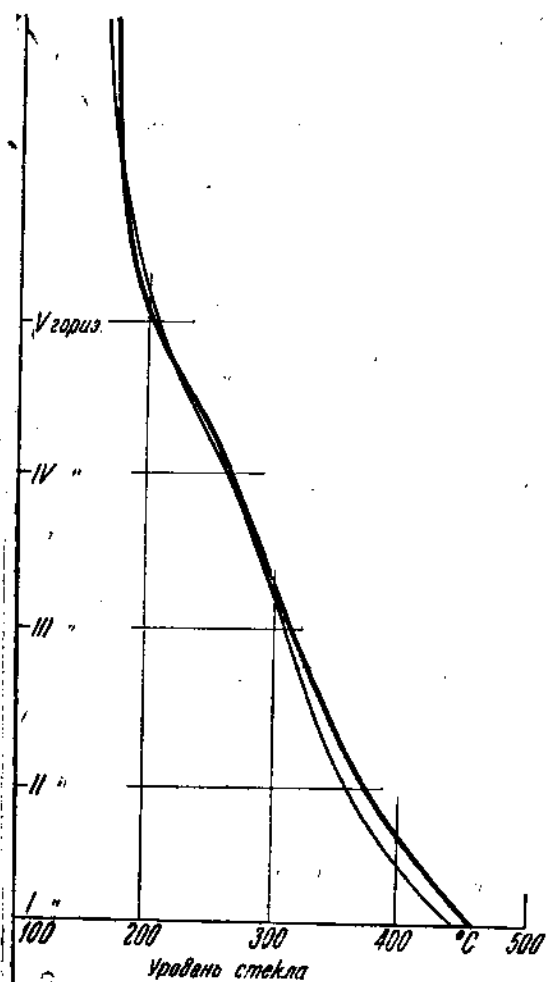


Рис. 33. Изменение средней температуры газового пространства шахты машины № 4.

гался на расстоянии 25—30 мм от ленты стекла. Температура записывалась каждые 3 мин. по всем 30 термометрам (сразу на 4 гальванометрах). При этом ежедневно определялась температура горячего воздуха по выходе из шахты (наверху под верхней площадкой). Тогда же измерялась и температура ленты по выходе из 12-й пары валиков. Через те же промежутки времени измерялась температура наружной поверхности машин, определялась толщина и скорость вытягивания ленты стекла, с одновременным учетом расхода воды на холодильники. На рис. 31 изображен поперечный, вертикальный разрез шахты машины Фурко с обозначением места ввода термопар (на 5 горизонтах).

Изучению подвергались 4 машины: № 3, 4, 8 и 9, действовавшие наиболее систематично и бесперебойно. Из них 3 машины имели ширину ленты 1350 мм и 1 (№ 8) — 1650 мм.

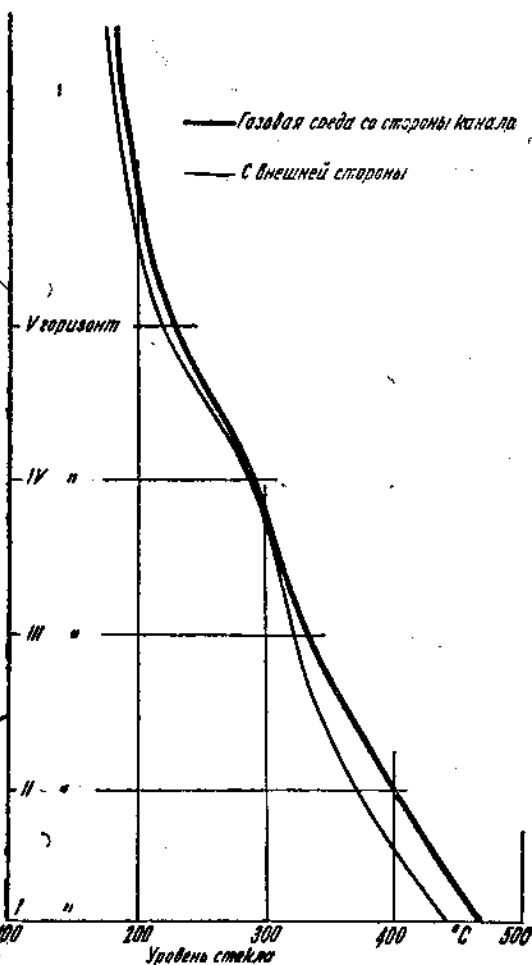


Рис. 34а. Изменение средней температуры газового пространства шахты машины № 8.

2. Распределение температур в газовой среде шахт машин № 3, 4, 8 и 9

Анализ теплового режима в шахте машин обнаруживает связь температурного распределения с рядом факторов: ориентацией относительно различных сторон шахты (обращенной к каналу и снаружи), местом ввода и вывода из холодильников, близостью к поперечным стенкам и наконец изменением температур по высоте шахты. С точки зрения системы канала (чехо-словацкой) представляет особый интерес именно первый фактор, влияние которого может дать материал к разрешению вопроса о рациональном размещении машин как на канале, так и в самом цеху.

а) Распределение температур по обеим сторонам ленты. Как уже сказано, этот вопрос является важным потому,

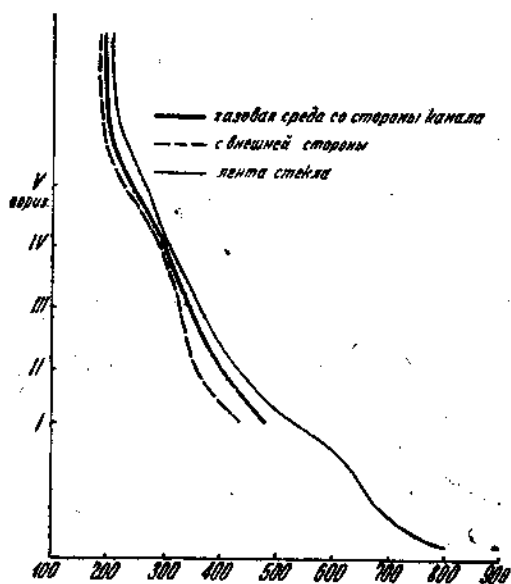


Рис. 34б. Изменение средней температуры газовой пространства шахты машины № 8 и ленты стекла.

что подчеркивает зависимость температурного режима шахты, а следовательно и ленты стекла, от расположения машины относительно канала. Поскольку исследованная система Фурко, построенная по чехо-словацкому принципу, не имеет постоянного двухстороннего обогрева машин, следует ожидать, что сторона шахты, обращенная к каналу, будет более теплой, чем наружная.

Действительно, анализируя средние температурные кривые по 4 изученным машинам, нетрудно убедиться в том, что все машины дают более высокую температуру на всех горизонтах со

стороны канала. На рис. 32, 33, 34 (а и б) и 35 даны температурные кривые — средние по всей ширине ленты; во всех случаях газовое пространство шахты более нагрето со стороны канала.

Особенно резкая разница обнаруживается у машин № 8 и 9, причём машина № 8 тянет широкую ленту; это обстоятельство усугубляет зависимость температуры соответствующей стороны шахты, поскольку источником тепла является стекломасса, идущая под лодочку; другая машина, № 9, находится в особых условиях повышенной теплоотдачи (рис. 42).

Если сравнить отдельные вертикальные зоны в шахте, то картина получается в сущности та же, но разница в температурах отражается наиболее заметно в нижних горизонтах, где влияние запаса стекла в стекломассе и в самом канале чувствуется сильнее, а случайные охлаждения воздушными потоками — меньше. На рис. 36 дано сравнение температур по средней вертикали с обеих сторон: ясно видна более повышенная температура со стороны канала на высоту по нижней рабочей площадке.

Сравнительная лучепрозрачность стеклянной ленты должна уравновешивать температурные разницы, однако в данном случае она сама является источником тепла, и при толстом стекле можно опасаться появления несимметричного напряжения на обеих плоскостях ленты, поскольку стекло мало теплопроводно. Полученная разность температур на одной горизонтали по машине № 9 доходит до 65°, а в среднем в пределах горизонтов 33—42°. Поскольку значение температур отжига в этой зоне около 500°,

такую разницу нельзя считать не стоящей внимания; при всех прочих равных условиях здесь частично можно помочь регулировкой дебета воды в холодильниках.

б) Влияние направления охлаждающей воды. Роль холодильников, которые должны резко снизить температуру вытягиваемой ленты с целью превратить жидкую стекломассу в твердую ленту, не ограничивается только областью подмашинных камер. Влияние протекающей в них воды, успевающей нагреться на протяжении ширины канала на $30-45^\circ$ (см. табл. 18), сказывается почти на всей высоте шахты. Сила этого влияния обуславливается разностью в температурном режиме воды на обеих сторонах ленты стекла. Как видно из табл. 18, температура выходящей воды со стороны канала — в среднем 43° , а снаружи — 55° . Это обстоятельство и нарушает симметрию изотермической карты, проведенной ранее (рис. 35). Однако влияние разной температуры воды можно проследить и далее по движению ленты. На рис. 37 а, б, в и г нанесены температурные кривые по высоте шахты всех 4 машин в 4 отдельных комбинациях. Взяты температуры по вертикалям с наружной стороны и со стороны канала, у входа воды и у ее выхода.

Сразу же обращает на себя внимание значительная компактность пучка кривых при выходе воды как с наружной стороны ленты, так и со стороны, обращенной к каналу. Наоборот, при входе воды кривые показывают большие температурные расхождения, т. е. вода играет нивелирующую роль, приводя температурные различия к некоторому минимуму. Во всех машинах направление тока воды — против часовой стрелки (если смотреть из ванны на средний крест).

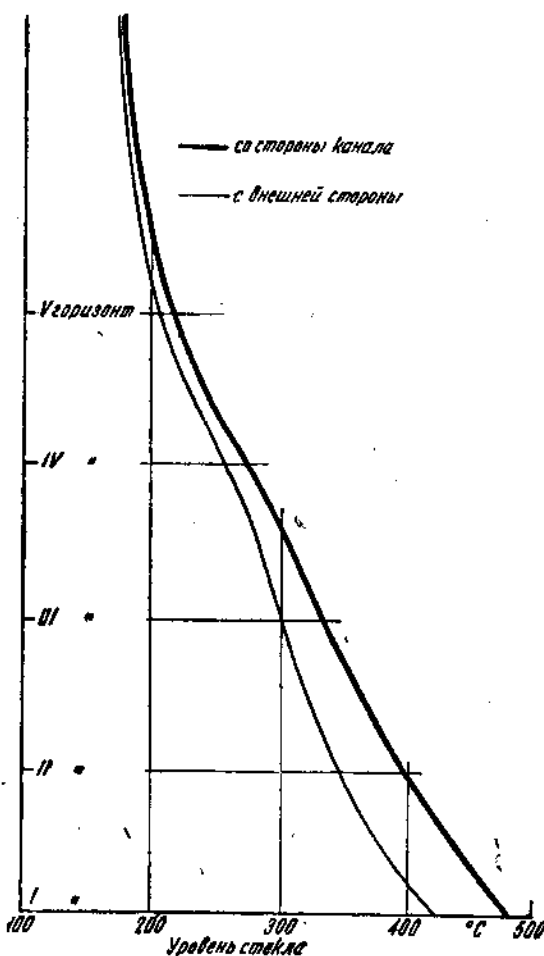


Рис. 35. Изменение средней температуры газового пространства шахты машины № 9.

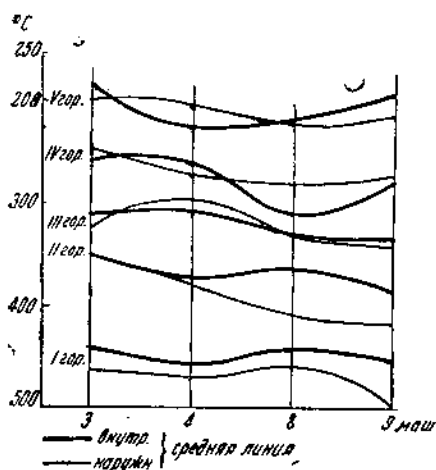


Рис. 36. Сравнение температур по средней вертикали с обеих сторон ленты 4 машин.

Далее при рассмотрении температурных кривых по 3 вертикалям в отдельных шахтах видно, что во всех 4 машинах (7 случаев из 8) температуры у вертикали при выходе воды ниже и средней и другой боковой вертикали (рис. 39—42); эта разница достигает 50° (машина № 9) на уровне «рубилона».

а) Распределение температур по ширине ленты. Это распределение частично становится ясным из предыдущего. Более детальное рассмотрение изменения температур по отдельным горизонтам дает следующее:

1) подавляющее количество кривых — 75% — имеет опре-

деленный характер с максимумом в центре;

2) остальные все приближаются к прямым, причем вогнутые кривые являются повидимому результатом ошибочных измерений температур по средней вертикали (случайное охлаждение горячего сита);

3) обращает на себя внимание уклон кривых в сторону движения воды; эта тенденция ясно обнаруживается у 90% измеренных горизонталей; это явление ранее уже отмечено;

4) наиболее резкий уклон обнаруживается машиной № 8;

5) никакой закономерности при переходе от одного горизонта к другому колебания температур вдоль ленты не обнаруживают, даже в пределах одной и той же машины по обеим сторонам ленты.

На рис. 38 дан график температурных колебаний по отдельным горизонтам исследованных 4 машин.

Обращает на себя внимание резкое колебание температур у машин № 8 и 9, как абсолютное, так и относительное. Как правило наружная сторона дает более резкие колебания, особенно на высоких горизонтах (конвекционные потоки холодного воздуха).

На рис. 39, 40, 41, 42 даны диаграммы изменения температур вдоль ленты.

г) Распределение температуры газовой среды по высоте шахты. Изменение температур по высоте шахты, в сущности говоря, определяет режим отжига ленты и является поэтому одним из важнейших этапов в процессе производства стекла по методу Фурко, поскольку бой ленты в шахте определяет окончательный брак изделий. С этой точки зрения является важным и то, что уже сказано выше по поводу горизонтального рас-

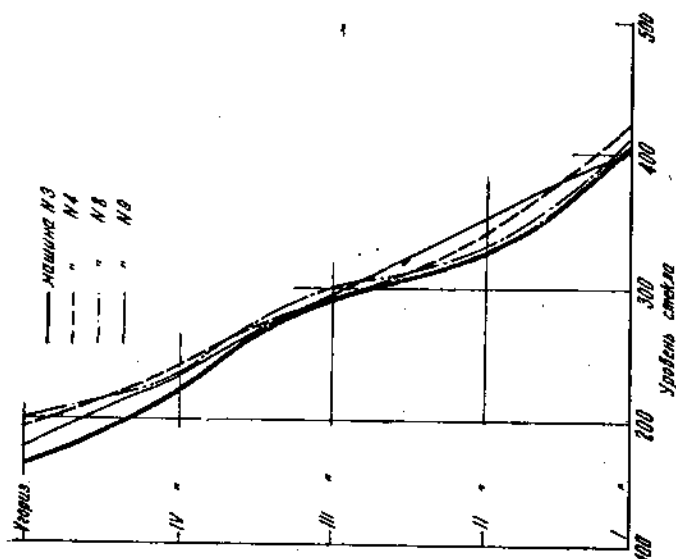


Рис. 376. Влияние направления охлаждения воды на температуру газового пространства шахты — наружная сторона (у края при выходе воды).

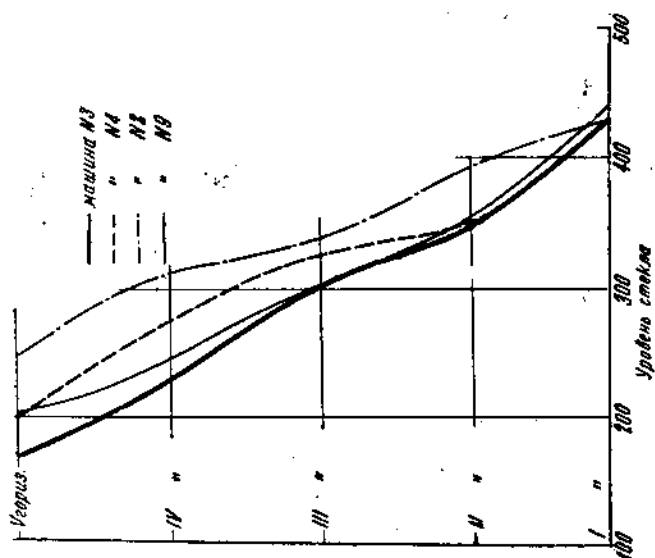


Рис. 37а. Влияние направления охлаждения воды на температуру газового пространства шахты — наружная сторона (у края при выходе воды).

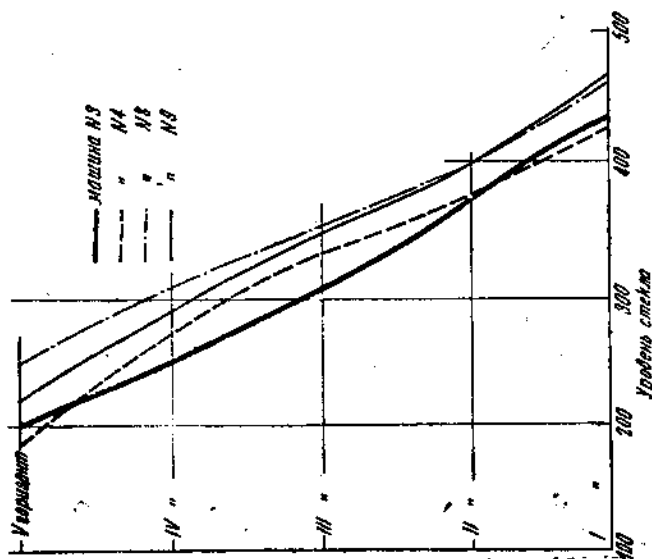


Рис. 37в. Влияние направления охлаждения воды на температуру газового пространства шахты — наружная сторона (у края при входе воды) со стороны канала.

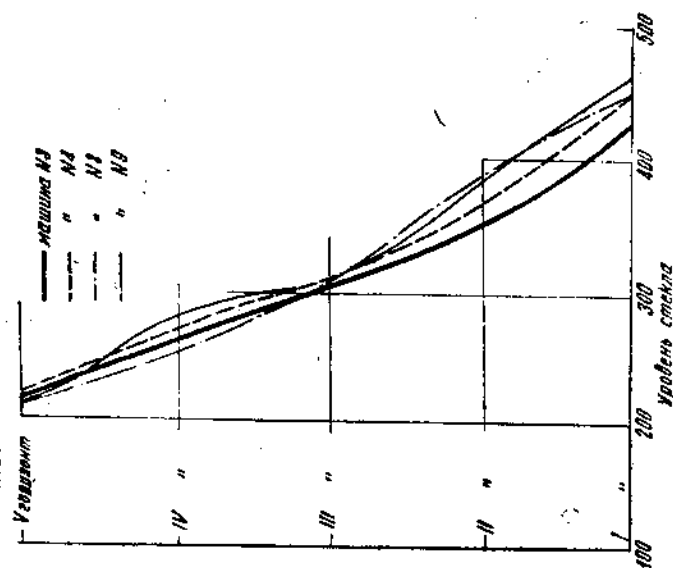


Рис. 37г. Влияние направления охлаждения воды на температуру газового пространства шахты — наружная сторона (у края при выходе воды) со стороны канала.

пределения температуры вдоль ленты. На рис. 43а, 43б, 44а, 44в, 45а, 45б, 46а, 46б даны кривые отжига, поскольку можно полагать, что температура газовой среды определяет и температуру самого стекла.

Цифровые данные приведены в соответствующих табл. 19, 20, 21 и 22.

Таблица 19

Изменение температуры газовой среды в шахте машины № 3

Горизонты	Расстояние от лодочки в мм (вверх)	К наружной стороне			В сторону канала		
		При входе воды (край)	Середина	При выходе воды (край)	При входе воды (край)	Середина	При выходе воды (край)
I	1 200	405	440	440	435	465	420
II	1 750	330	350	360	370	350	340
III	2 350	295	315	310	300	325	295
IV	2 950	225	260	235	250	250	225
V	3 550	170	185	180	205	200	185

Таблица 20

Изменение температуры газовой среды в шахте машины № 4

Горизонты	Расстояние от лодочки в мм (вверх)	К наружной стороне			В сторону канала		
		При входе воды (край)	Середина	При выходе воды (край)	При входе воды (край)	Середина	При выходе воды (край)
I	1 200	450	460	430	430	470	450
II	1 750	360	375	350	375	380	365
III	2 350	335	305	300	330	300	305
IV	2 950	280	265	245	270	270	260
V	3 550	205	225	205	180	205	205

Таблица 21

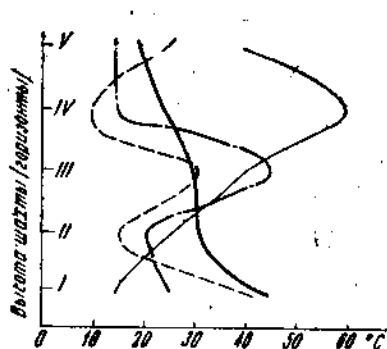
Изменение температуры газовой среды в шахте машины № 8

Горизонты	Расстояние от лодочки в мм (вверх)	К наружной стороне			В сторону канала		
		При входе воды (край)	Середина	При выходе воды (край)	При входе воды (край)	Середина	При выходе воды (край)
I	1 200	440	445	410	465	460	450
II	1 750	395	365	340	400	410	385
III	2 350	370	330	300	350	330	310
IV	2 950	315	310	240	305	285	245
V	3 550	240	215	205	250	220	210

Таблица 22

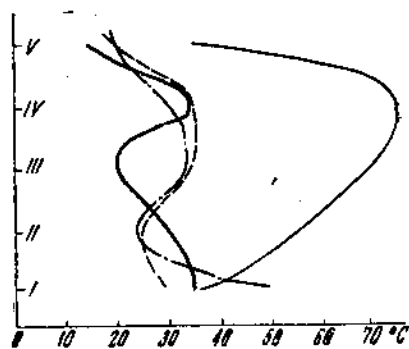
Изменение температуры газовой среды в шахте машины № 9

Горизонты	Расстояние от лодочки в мм (вверх)	К наружной стороне			В сторону канала		
		При входе воды (край)	Середина	При выходе воды (край)	При входе воды (край)	Середина	При выходе воды (край)
I	1 200	455	455	405	475	495	470
II	1 750	365	385	360	405	415	395
III	2 350	310	335	300	345	340	300
IV	2 950	250	280	240	290	275	285
V	3 550	210	195	190	220	215	210



— N3
 --- N4
 — N8
 --- N9

со стороны канала



— N3
 --- N4
 — N8
 --- N9

с наружной стороны

Рис. 38. Диаграмма температурных разниц вдоль ленты на разных горизонтах

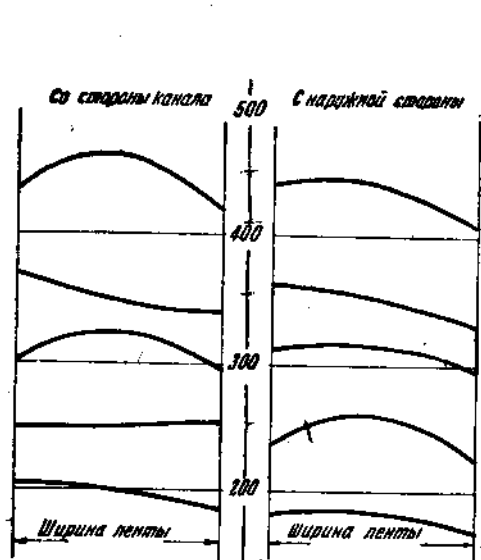


Рис. 39. Изменение температур газовой среды с двух сторон ленты в машине № 3 (по ширине ленты).

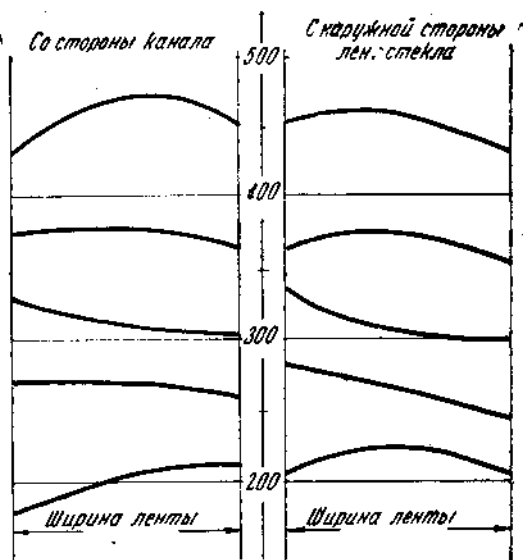


Рис. 40. Изменение температур газовой среды с двух сторон ленты в машине № 4 (по ширине ленты).

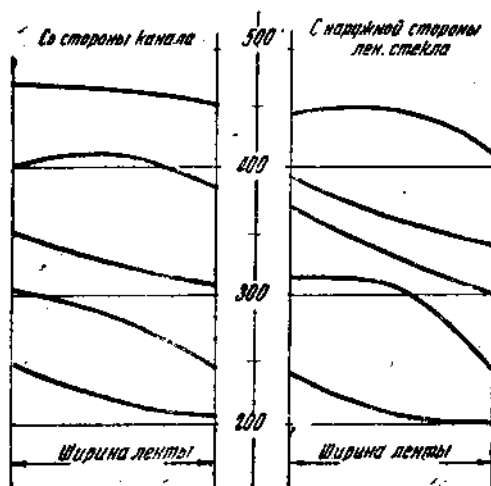


Рис. 41. Изменение температур газовой среды с двух сторон ленты в машине № 8 (по ширине ленты).

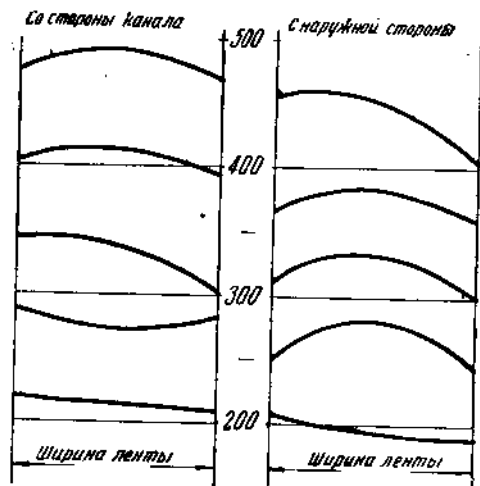


Рис. 42. Изменение температур газовой среды с двух сторон ленты в машине № 9 (по ширине ленты).

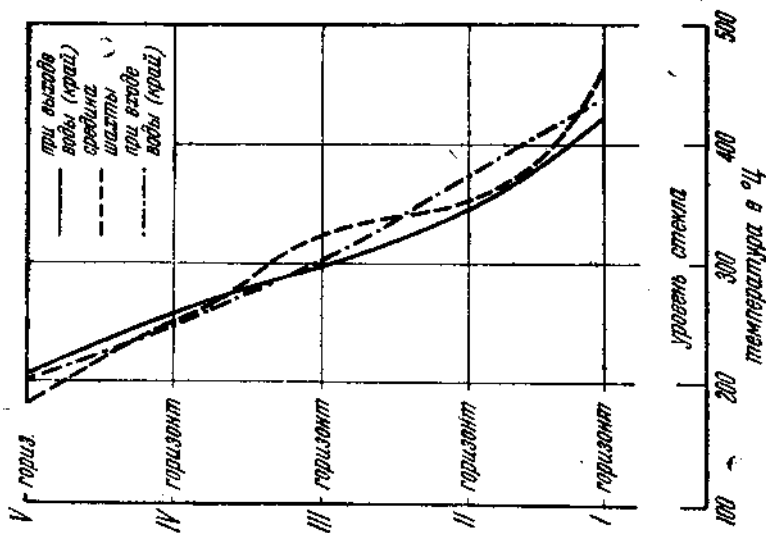


Рис. 43а. Изменение температуры газового пространства в шахте машины № 3 по высоте (со стороны канала).

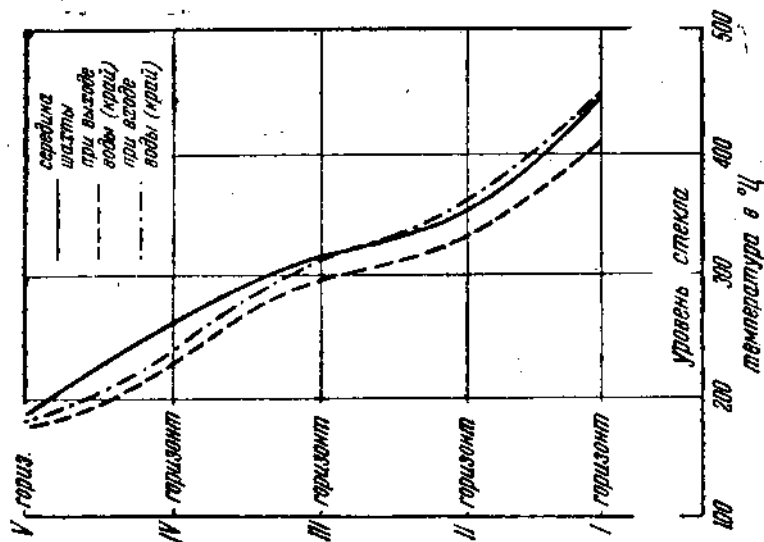


Рис. 43б. Изменение температуры газового пространства в шахте машины № 3 по высоте (с наружной стороны).

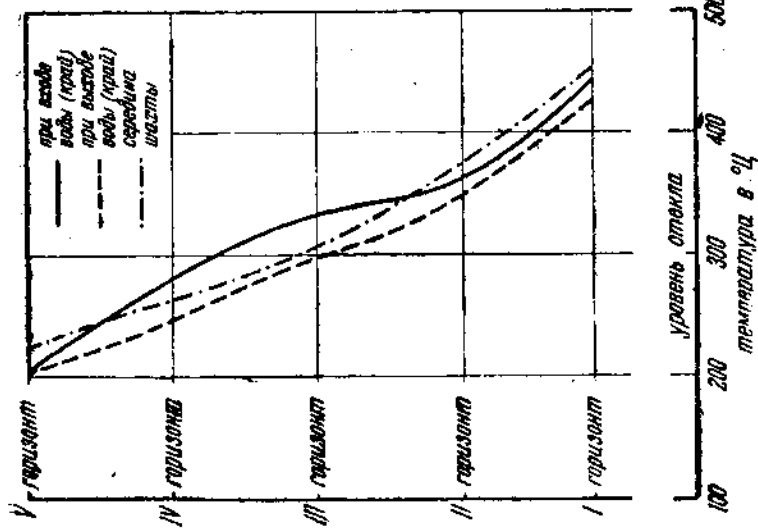


Рис. 44а. Изменение температуры газового пространства в шахте машины № 4 (с наружной стороны).

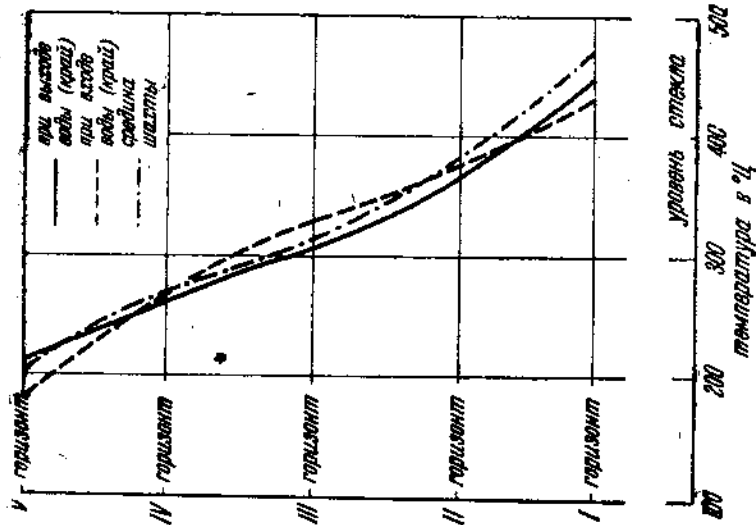


Рис. 44б. Изменение температуры газового пространства в шахте машины № 4 по высоте (со стороны канала).

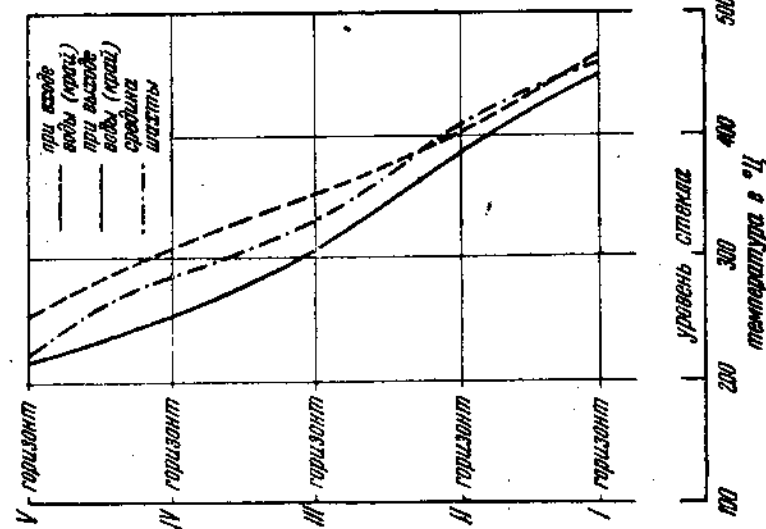


Рис. 45а. Изменение температуры газового пространства в шахте машины № 8 по высоте (со стороны канала).

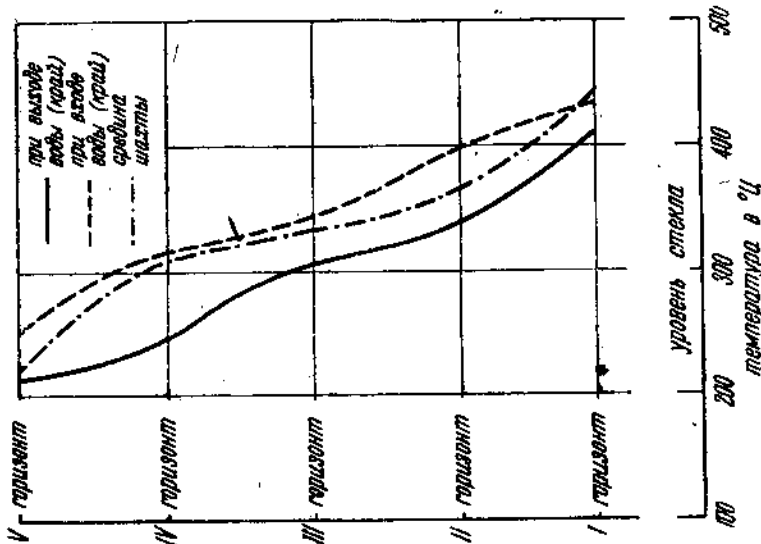


Рис. 45б. Изменение температуры газового пространства в шахте машины № 8 по высоте (наружная сторона).

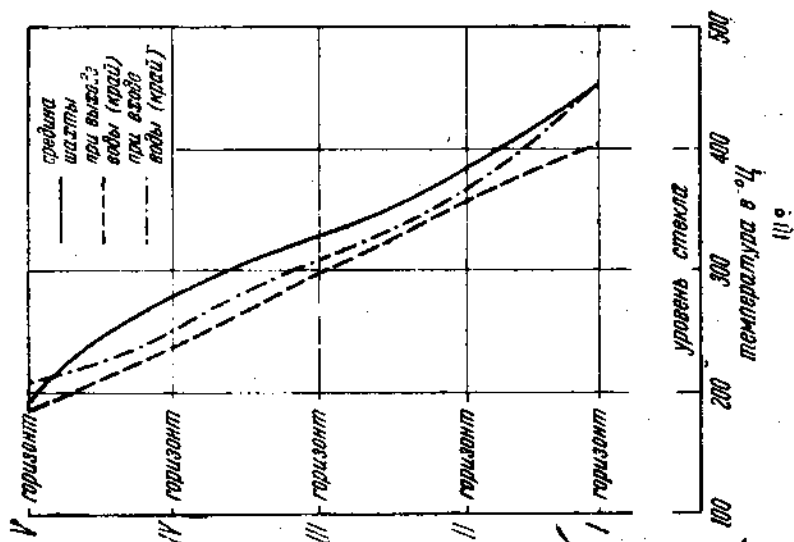


Рис. 46б. Изменение температуры газового пространства в шахте машины № 9 по высоте (с наружной стороны).

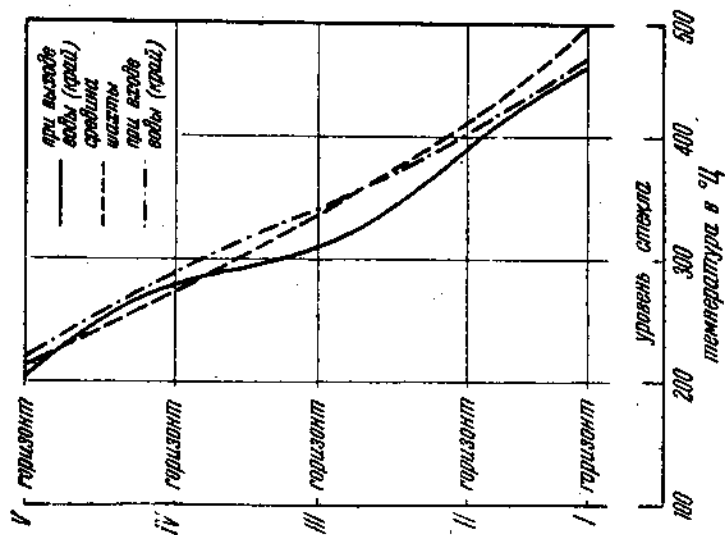


Рис. 46а. Изменение температуры газового пространства в шахте машины № 9 по высоте (со стороны канала).

Для удобства анализа и сравнения по каждой машине изменения температуры по 3 вертикалям с каждой стороны сведены в 1 кривую и представлены на рис. 32, 33, 34 и 35 (см. выше), а температурные значения приведены в табл. 23.

Таблица 23

Средние значения температуры газового пространства в шахтах машин № 3, 4, 8 и 9

Горизонты	Сторона от канала				Наружная сторона			
	Маш. № 4	Маш. № 3	Маш. № 8	Маш. № 9	Маш. № 4	Маш. № 3	Маш. № 8	Маш. № 9
I—на расст. 1 200 мм от лодочки	450	440	460	480	445	435	440	450
II—на расст. 1 750 мм от лодочки	375	360	400	405	360	345	365	370
III—на расст. 2 350 мм от лодочки	315	305	330	340	315	305	325	315
IV—на расст. 2 950 мм от лодочки	265	250	290	280	260	240	285	255
V—на расст. 3 550 мм от лодочки	210	195	225	215	200	180	220	200
При выходе ленты из шахты	175	165	190	180	170	160	180	170

Сопоставляя «кривую отжига» на разных машинах, можно заметить следующее.

1. На различных горизонтах разница в температурах по отдельным машинам составляет примерно одинаковую величину: 30—45°.

2. Все машины выше III горизонта имеют перегиб кривой (250—270), где охлаждение становится более интенсивным; выше IV. горизонта падение температуры вновь замедляется.

3. Наиболее резкое охлаждение заметно между I и II горизонтами — в зоне температур 380—450°.

4. Как правило, температура снаружи падает быстрее, чем внутри (на I и II горизонтах).

5. Наиболее «горячие» — машины № 8 и 9: у них на интервале высоты I горизонт—III горизонт температура падает с 150—180 до 330—340°, т. е. в среднем 1,2°/см.

Как показывает таблица 24, машина № 8 за час вытягивала наибольшее количество стекла.

Толщина, ширина, скорость движения ленты стекла и количество
выработанного фабриката

№ маш.	Толщина ленты			Ширина ленты	Скорость вытягив. 1 м ленты стекла	Масса вытягив. стекла в кв. м в 1 час	Объем массы вы- тянутого стекла в куб. м за 1 час	Вес мас- сы вытя- нут. стек. в кг за 1 час
	Левый борт	Сере- днина	Прав- ый борт					
4	8,5	8,4	8,5	1350	2 м 03 сек.	39,51	0,1383	345,75
3	8,2	8,2	8,2	1350	2 " 13 "	38,54	0,1169	292,20
8	3,0	2,7	8,1	1650	1 " 57 "	50,77	0,1522	380,50
9	3,2	3,3	3,2	1350	2 " 03 "	39,51	0,1264	316,00

Примечание. Заводское обозначение стекла — «Двойное».

3. Распределение температур по поверхности шахты

Поскольку режим отжига ленты связан с температурой газовой среды в шахте Фурко, а последняя (температура) весьма чутко реагирует на изменение теплового состояния самого материала шахты, так как он (чугун) является весьма теплопроводным, то весьма существенным является рассмотрение и этих температур.

На поверхности шахты температуры измерены также по 3 вертикалям, но по горизонтам взяты лишь 3 точки: на уровне нижней рабочей площадки (между II и III горизонтами термопар), между нижней и верхней площадками (на уровне V горизонта термопар) и под верхней площадкой. Измерение температур по соответствующим вертикалям представлено на рис. 47, 48, 49 и 50, а также на табл. 25.

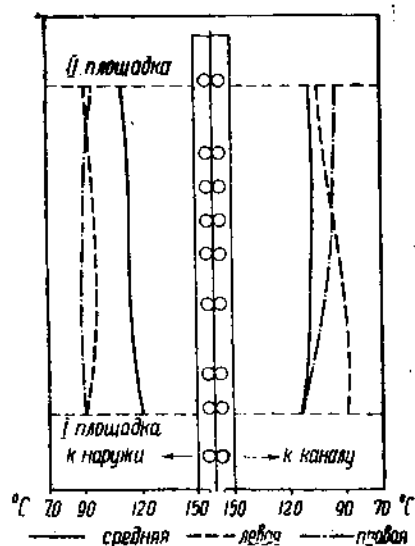


Рис. 47. Температура наружных стенок шахты машины № 3.

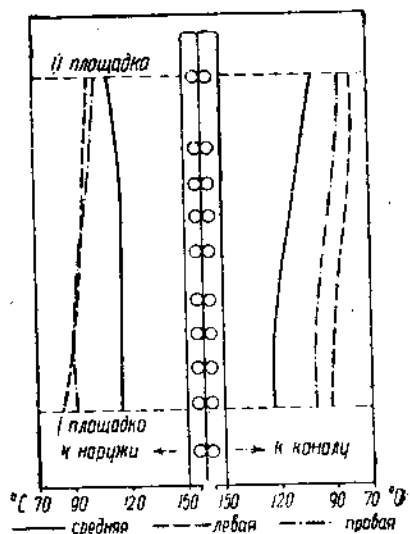


Рис. 48. Температура наружных стенок шахты машины № 4.

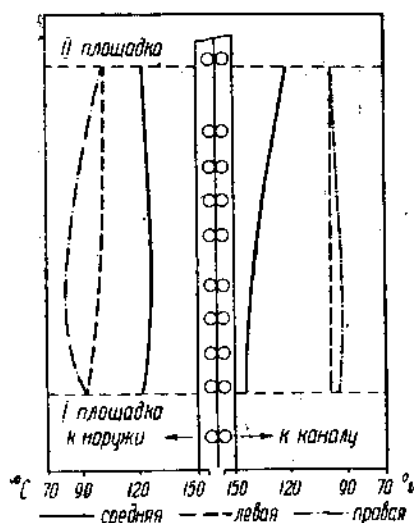


Рис. 49. Температура наружных стенок шахты машины № 8.

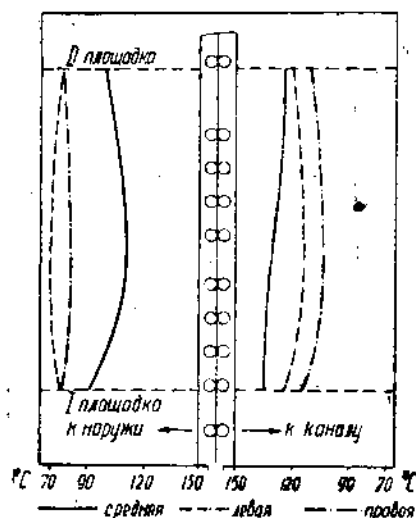


Рис. 50. Температура наружных стенок шахты машины № 9.

Таблица 25

Температура наружных стенок шахт машины № 4, 3, 8 и 9

№ маш.	Обозначение горизонтов измерен.	Наружная сторона			Сторона к каналу		
		Точки по ширине машины					
		Левая	Средняя	Правая	Левая	Средняя	Правая
4	Низ	85	115	90	92	123	100
	Середина	95	115	95	85	115	95
	Верх	100	110	103	80	100	85
3	Низ	90	120	90	90	115	115
	Середина	95	115	90	95	110	100
	Верх	90	110	95	105	110	95
8	Низ	90	120	90	200	145	95
	Середина	82	125	100	100	138	95
	Верх	100	120	100	100	123	100
9	Низ	75	90	70	125	635	115
	Середина	70	110	80	115	130	103
	Верх	75	100	75	120	125	110

В среднем по всем машинам

Низ	85	111	85	102	129	106
Середина	85	116	91	99	123	99
Верх	91	110	93	101	115	98
По всей высоте	87	112	90	101	122	101

Температура стенок определялась при помощи особого пирометра — «поверхностного щупа» с Fe-Const — новой термопарой, откалиброванными таким образом, что точность показаний заключалась в пределах $\pm 5^\circ$.

Данные, помещенные в табл. 25, являются результатом наблюдений за ряд смен, причем по каждой машине температура измерялась через $1\frac{1}{2}$ —2 часа; места измерения — по тем же вертикалям, что и температура газовой среды шахты. Результаты измерения показывают следующее:

1) во всех изученных случаях (8 сторон у 4 машин) температура по середине шахты выше температур боковых ее частей. Максимальная разность — 50° (машина № 8 — на нижнем горизонте). Как правило, разница уменьшается по высоте, и во всяком случае больше 10° . В некоторых случаях температура по вертикали изменяется весьма мало.

2) Температуры по боковым вертикалям весьма сходны между собой и сравнительно слабо изменяются по высоте.

3) Вся температура со стороны канала выше температур наружной поверхности: примерная разница по отдельным горизонтам (в среднем) 15 — 28° ; наибольшая температура и наибольшая соответствующая разница по средней вертикали — 10° . Это расположение хорошо согласуется с аналогичным распределением температур внутри шахты. Однако при сопоставлении наружных температур с температурами газового пространства в самой шахте на одинаковых горизонтах обращает на себя внимание отсутствие такой резкой разницы. Поэтому температуру наружных поверхностей следует считать более подверженной случайным колебаниям вследствие движения воздушных потоков.

4. Температура ленты стекломассы

Для получения «истинной» температуры отжига ленты стекла, вытягиваемой машиной Фурко, был использован метод впайвания голого спая тонкой никель-нихромовой термопары длиной в 5 м в «луковицу» стекломассы в машине № 8. Таким образом по мере вытягивания ленты подымалась и впаянная в борт листа термопара. Таких термопар было впаяно 3: две по бортам, а третья в середине ленты; однако последняя дошла только до 3-й пары валков и разрушилась (отскочил королек спая). Толщина ленты стекла во время этого пирометража — 2,8—3,2 мм, скорость вытяжки — 1 м в 2 мин. 10 сек. Наблюдение температуры производилось сперва через 10 сек., а затем после «рубикона» через 30 сек. На рис. 346 приведена найденная температурная кривая. Как видно на диаграмме, температура ленты резко падает от горизонта верхнего края лодочки до верхнего края холодильника. Здесь — на высоте 0,26 м — температура падает на 210° (с 940 до 730° , т. е. на $8^\circ/\text{см}$, или по времени — 7° в 1 сек.). Далее падение задерживается, и к «рубикону» лента подходит с температурой 535° , т. е. на расстоянии 0,94 м от края холодильника охлаждается на 200° , т. е. $2,2^\circ$ на 1 см, или по времени — $1,7^\circ$

в 1 сек. (или 102° в 1 мин.). Вступая в шахту, лента стекла постепенно по температуре своей приближается к температуре газовой среды, максимальное приближение осуществляется на горизонте IV, где эти температуры равны сопротивлению 280—285.

Выпуклые места по кривой иллюстрируют задержку в остывании, вызванную конфигурацией подмашинной камеры (газовый мешок наверху), а также наличием наклонных пластин у нижнего люка, по которым спускают бой.

Сравнение температур ленты и газовой среды обнаруживает следующее:

1. Максимальная разница температур на горизонте рубикона составляет $70-80^\circ$.

2. По мере продвижения вверх по шахте температуры эти сближаются (постепенно, почти что сливаясь) на высоте 3 м от лодочки.

3. В более высоких областях шахты вследствие прососа воздуха температура газовой среды падает быстрее температуры ленты, и разница между ними увеличивается.

4. Температура выхода ленты при данном производственном режиме (у горизонта верхней площадки) равна примерно $170-180^\circ$.

В. Выводы по изучению режима машин Фурко

Имея в виду все сказанное по поводу теплового режима исследованных шахт машин Фурко, характеризующего состояние, как газовой среды, так и самой шахты, ленты стекломассы,— можно сделать следующие выводы:

а) При расположении машин по чехо-словацкой системе тепловой режим газовой среды шахты заметно отличается по обоим сторонам ленты: сторона, обращенная к каналу, является перегретой.

б) Так как направление потока воды в холодильниках явно отражается на температуре шахты, то можно рекомендовать для выправления температурной асимметрии встречный ток воды (вместо имеющего место параллельного по обоим холодильникам).

в) Сравнительно резкие колебания температур по ширине ленты (в горизонтальном направлении), наблюдаемые у исследованных машин, следует считать неблагоприятно отражающимися на режиме отжига; мерой, нивелирующей разницу, можно считать наличие соответствующей внутренней изоляции шахт.

г) С этой точки зрения интересно сопоставление разниц температур по ширине шахты, полученных в шахтах машин Фурко, расположенных по бельгийской системе. На уровне «рубикона» для большинства исследованных машин (6 из 9)¹ температура посредине была на $85-95^\circ$ выше температур краев, причем точка измерения отстояла от ленты на 200 мм. В исследованных маши-

¹ Указанная работа проведена М. Г. Степаненко на Константиновском оконном заводе в 1928 г.

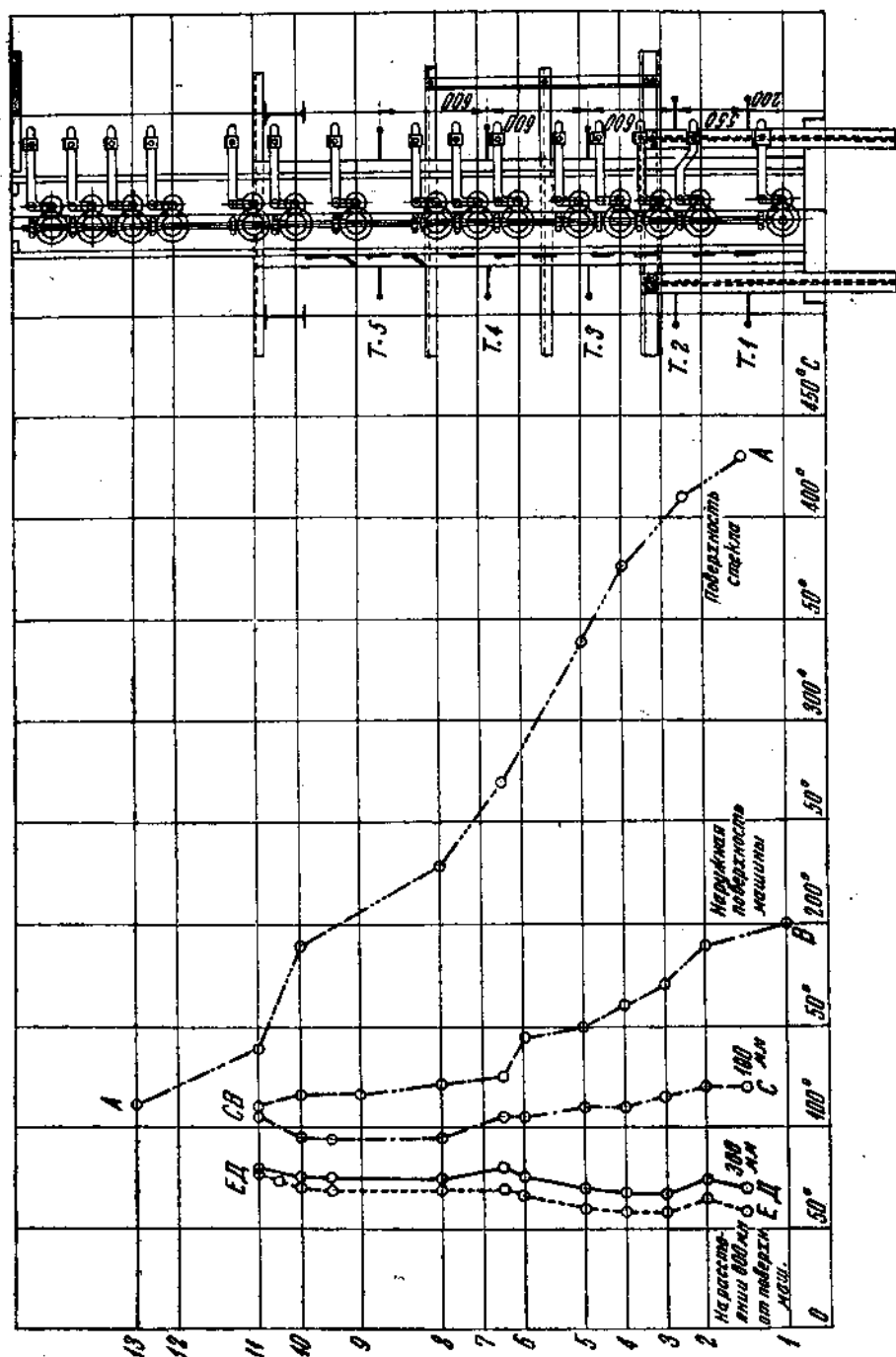


Рис. 51. Изменение температур ленты стекла поверхности шахты и воздуха около нее по высоте (на машине Фурко) по Бромлею.

нах чехо-словацкой системы максимальная разница не превышала 35—45°, что следует приписать более близкому расстоянию термспар от ленты (20 мм).

д) Тепловой режим шахт с точки зрения абсолютных температур не дает оснований к нахождению тесной зависимости между температурой газовой среды у «рубикона» и производительностью

машины. Сравнение данных, полученных на машинах бельгийской системы, показывает, что там максимальные температуры на горизонте «рубикона» в середине шахты получились у машин либо вытягивающих наиболее толстое стекло, либо работавших уже длительное время (110—120 час.).

е) Температуры поверхности шахты обнаружили зависимость от положения этой наружной поверхности, причем наиболее высокое значение температур относится к средней вертикали. Сравнение этих температур с температурами поверхностей шахт, расположенных по бельгийской системе¹, показывает, что в последнем случае температуры значительно выше. На рис. 51 приведены кривые, взятые из работы проф. Бромлея, изучившего теп-

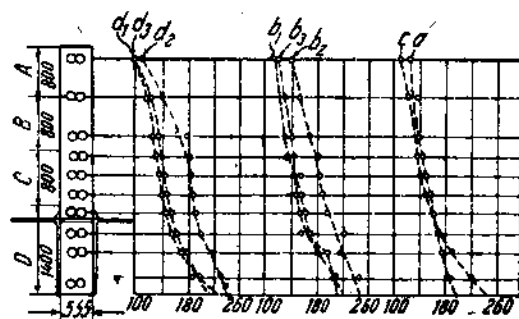


Рис. 52а. Изменение температур по высоте поверхности шахты машины Фурко № 5 (завод Белый Бычок) (по ЛОТИ).

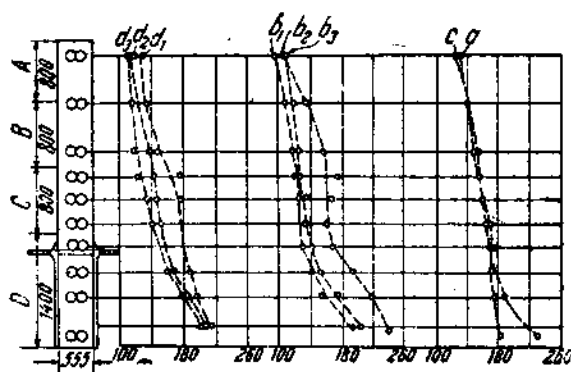


Рис. 52б. Изменение температур по высоте поверхности шахты машины Фурко № 2.

ловой режим шахты на константиновском оконном заводе.

При измерении температур ленты стекла в шахте машины Фурко, температуры ее поверхности, а также воздуха, омывающего машину (В. Э. Бромлей), обращает на себя внимание сравнительно резкое снижение температуры по высоте, что является следствием охлаждающего влияния воздушных вентиляционных потоков. Однако температуры наверху шахты у верхней площадки являются совпадающими у обеих систем (бельгийской и чехо-словацкой).

¹ См. работу проф. Бромлея, напечатанную в «Sprechsaal», № 4, 1928 г.

Превышение температур поверхности шахты по срединной вертикали является общим явлением. Работа ЛОТИ (см. ниже) показывает, что и при бельгийской системе получается аналогичное температурное распределение (рис. 52, а и б).

Как видно из диаграмм, измеренные «щупом» температуры на бельгийских машинах дают значительно более высокие значения.

ж) Изменение температуры ленты представляется закономерным и плавным. Сравнение температур ленты, измеренных проф. Бромлеем (рис. 51), показывает совершенно иной характер падения температур. В то время как впаянная в борт ленты термопара обнаруживает падение по выгнутой кривой, термопара, соприкасающаяся с поверхностью ленты, дает выпуклую температурную кривую. Эту разницу следует приписать различному состоянию газовой среды в изученных шахтах. Выгнутая кривая обусловливается ускоряющим действием холодных конвекционных потоков воздуха.

Аналогичную картину дают измерения ЛОТИ, исследовавших температуру ленты стекла (при помощи «щупа») 5 машин Фурко на заводе оконного стекла в «Белом Бычке»¹. Полученные кривые к выходному концу машины дают почти совпадающие значения температур.

Как видно из приводимых диаграмм, температуры ленты стекла, выходящего из машины, колеблются в узких пределах; учитывая разные методы измерения, можно признать их совпадающими и равными по величине 150—180° (на горизонте верхней площадки).

¹ Исследования режима отжига стекла ЛОТИ 1932 г. (отчет по исследовательской работе на заводе «Белый Бычок»).

М. Г. Степаненко

М. И. Губин

ГЛУБИННЫЙ ПИРОМЕТРАЖ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

1. Причины и цель температурного обследования

Объектом излагаемого ниже глубинного пирометража являлась небольшая опытная ванная печь, построенная на стекольном заводе им. Уханова (Москва), вырабатывающего электроколбочное стекло. Указанная печь поставлена с целью производства дровот и трубок по способу Королева, почему общая форма, размеры и конфигурация ванны приурочены к особенностям этого метода. Ближайшей причиной температурного исследования послужило следующее.

В процессе работы по вытяжке дровот методом Королева, при работе на свинцовой шихте, было замечено появление в изделиях неоднородного стекла, что вызвало целый ряд соображений по поводу расслоения стекломассы, влекущего за собой различие в процентном содержании свинца в различных зонах бассейна. Эти обстоятельства побудили заводоуправление предпринять изучение состава стекломассы в отдельных участках бассейна и по различным горизонталям ее. Вначале это пытались осуществить весьма элементарным способом, при помощи железной трубы, конец которой заполнялся за счет гидростатического давления стекломассой при открытии верхнего конца трубы.

Взятые таким способом пробы стекломассы не могли быть подвергнуты необходимому и всестороннему исследованию, ибо рассыпались в порошок при попытке извлечь пробы из трубы; кроме того какой-либо более или менее точной локализации мест взятия проб при таком способе достигнуть было нельзя.

Тогда завод обратился к Ин-ту стекла, который и взял на себя разрешение предложенной задачи. Согласно выработанной программе все исследование распадалось на 3 части:

- 1) взятие проб в различных местах бассейна по принципу пространственной сетки;
- 2) параллельный глубинный пирометраж в пределах той же пространственной решетки с целью связать структуру, гомогензацию и состав стекломассы с температурными значениями, имея в виду тесную зависимость между температурой и состоянием стекломассы;

3) физико-химическое изучение взятых проб с целью установления однородности свойств и состава.

Таким образом глубинный пирометраж является органической частью общего исследования бассейна стекломассы, и поэтому выводы по линии распределения температур в ней могут быть развиты в двух направлениях.

С одной стороны, температурные данные должны быть привлечены к объяснению общей физико-химической картины состояния стекломассы в бассейне и процесса варки ее, а с другой стороны, глубинный пирометраж ванны интересен сам по себе, давая новый материал к нашему еще весьма недостаточному знакомству с вопросом о распределении температур в стекломассе, который позволил бы полностью осветить один из важнейших вопросов варки и поведения стекломассы в ванне — именно вопрос о потоках.

Вместе с этим исследование позволило бы определить степень пригодности применяемого метода и специальной аппаратуры, общепризнанных типов которых для ванной цели в сущности еще мировая техника не имеет.

II. Аппаратура для глубинного пирометража

Имея в виду фиксацию температур стекломассы в пределах всего бассейна ванны, как варочной, так и рафинажной частей ее, необходимо было выбрать такую аппаратуру, которая, во-

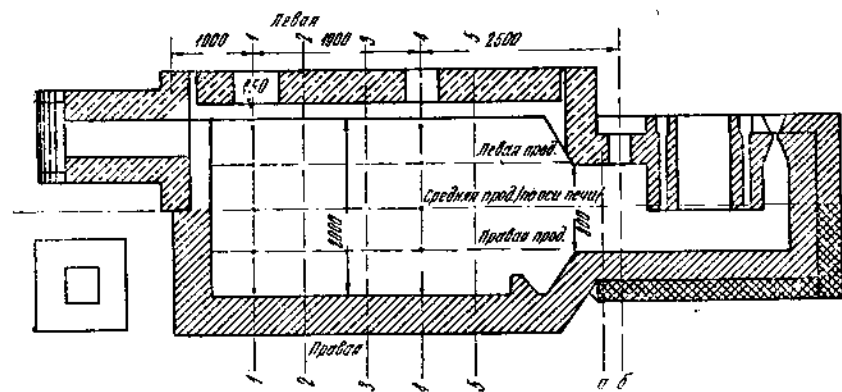


Рис. 1. Горизонтальный разрез ванной печи.

первых, отвечала бы имеющимся в бассейне температурным условиям, во-вторых, конструкция которой позволяла бы, применительно к устройству ванны, измерять температуру во всех намеченных условных точках пространственной сетки; наконец, в третьих, используемая измерительная аппаратура должна гарантировать правильность температурных показаний во всех точках исследуемой среды.

Всем этим трем условиям в достаточной мере отвечает специально сконструированная пирометрическая аппаратура проф.

В. Э. Бромлея. Учитывая температурные пределы в бассейне стекломассы и характер самой среды (жидкая горячая масса), единственным пригодным пирометром явится платино-платинородиевая термопара с гальванометром, смонтированная таким образом, чтобы обеспечить постоянство температуры холодного спая.

Прибор (рис. 1)¹ представляет собой систему двух концентрических дугообразно изогнутых тонких стальных труб; между ними циркулирует охлаждающая вода, а по средней трубке проходит провод от термопары, горячий спай которой выходит за пределы стального наконечника.

Будучи, для удобства манипулирования, подвешенным на шарнирном рычаге к подвижному блоку, перемещающемуся по балке вдоль длинной оси печи, саблеобразный пирометр вводится передним концом, у которого помещен горячий спай, термопары, через окно сперва в газовое пространство печи, а затем и в стекломассу. Длина дуги пирометра рассчитана так, что она делает доступной любую точку в толще стекломассы, обеспечивая возможность при благоприятных условиях, исчерпывающего глубинного пирометража, причем загнутый конец прибора позволяет помещать спай термопары не только в углы, образуемые плоскостями стен и дна ванны, но и в углубления между стеновыми брусками, получившиеся вследствие разъедания их стекломассой.

Указанный прибор — глубинный пирометр с платино-платинородиевой термопарой проф. В. Э. Бромлея — был год назад опробован на заводе им. Калинина и вполне оправдал свое назначение.

Как показали результаты настоящей работы, благодаря этому пирометру оказалось возможным и в данном случае произвести достаточно точно локализованное измерение температур в глубине стекломассы.

III. Характеристика ванной печи

Послужившая объектом глубинного пирометража стекловаренная печь представляет собой ванну с горелками, устроенными по типу Сименса; ванная печь отапливается нефтью (паровая форсунка).

Основная конструктивная характеристика видна из рис. 2 и 3 (план, продольный и поперечный разрез печи). Размеры варочного бассейна 2000×4150 мм, дающие площадь $9,3$ м², позволяют определить производительность ванны в $4,5$ — 5 т в сутки. Фактическая производительность ее гораздо ниже, принимая во внимание опытный характер ванны и период осваивания выработки дров по способу Королева. Выработочная часть ванны соединяется с рафинажной при помощи перешейка в виде суженного участка бассейна. Ширина этого перешейка — 800 мм. Газовое пространство варочной и выработочной части ванны разделяется

¹ См. ст. «Теплотехн. исследование канала и машины Фурко чехо-словацкой системы».

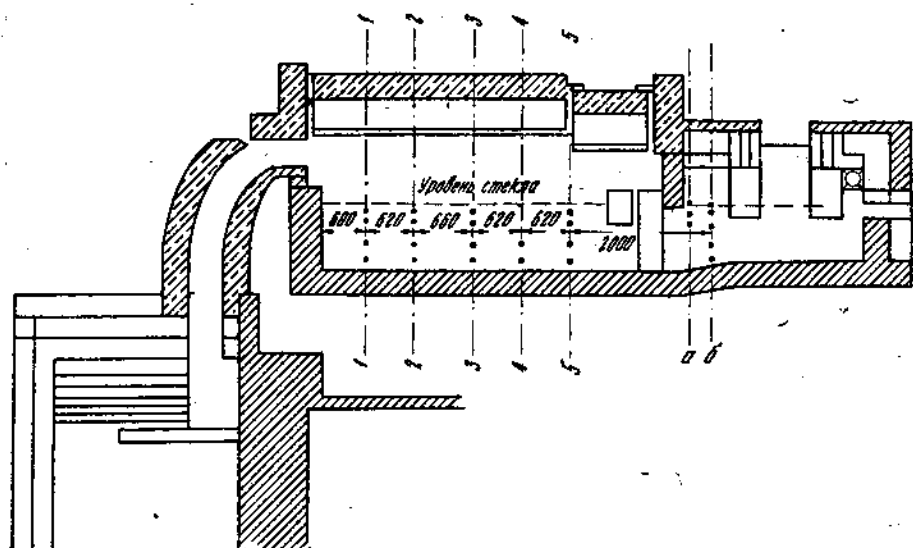


Рис. 2. Продольный разрез ванной печи.

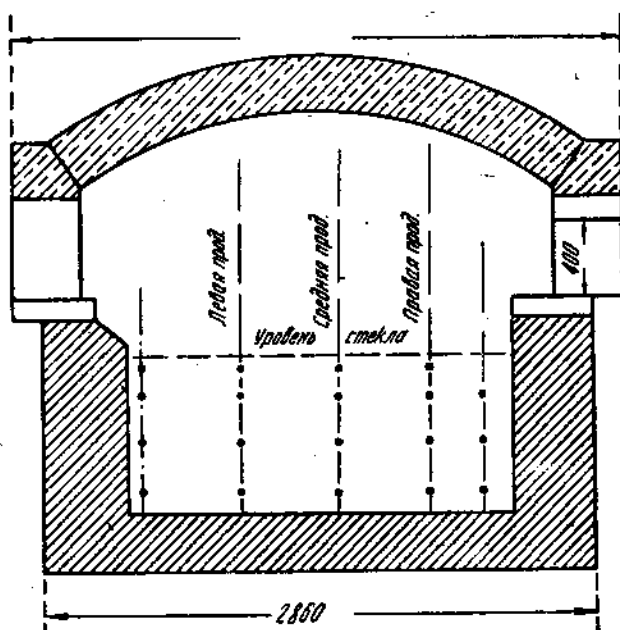


Рис. 3. Поперечный разрез ванной печи.

мостом, который должен быть погружен в стекломассу на 30—50 мм. При производстве обследования уровень стекломассы был спущен, так что мост оказался непогруженным, а вследствие небольшого перекаса щель между краем моста и уровнем стекломассы получилась разной ширины, что сразу же отразилось на

температурах поверхностных слоев стекломассы выработочной части. Глубина бассейна—900 мм, а толщина стекломассы—800 мм, выработочная часть—на 200 мм выше.

Выработочная часть ванны представляет собой небольшой бассейн размером $2,4 \times 0,8 \times 0,68$. В средней части помещается подмашинная камера, отделенная двумя мостами, погруженными на 100 мм и имеющими в толще юбогреваемые каналы.

Засыпка шихты производилась у передней части печи с одной стороны (с правой, согласно принятому при работе обозначению).

IV. Метод исследования

Как уже указано, настоящая работа является лишь частью общего технологического обследования, имевшего целью выяснить вопрос о варке свинцового стекла в небольших ваннных печах. Центр тяжести работ лежал в физико-химическом изучении проб стекломассы, взятых в различных точках бассейна. Однако весьма интересной, тесно связанной с состоянием стекломассы является температурная характеристика стекломассы, которая определялась методом глубинного пирометража. Описание применявшегося пирометра уже дано выше, и здесь следует только указать на методологическую сторону работы, послужившей основанием к выбору определенной системы точек, подлежащих температурному исследованию. Помимо общих принципиальных соображений при практическом осуществлении пирометража приходилось приспособляться к двум факторам:

1) конструктивной особенности данной печи, обуславливающей определенную доступность различных точек в объеме стекломассы измерению снаружи;

2) конструкции используемого прибора—глубинного пирометра проф. В. Э. Бромлея.

Далее количество точек, подлежащих температурному обследованию, должно было быть выбрано такое, чтобы удовлетворить общим поставленным задачам и соответствовать практической степени точности прибора.

Исходя из наличия уже готового прибора, а также расположения окон в боковых стенках ванны, намечены были системы плоскостей, в которых предполагались измерения температур отдельных точек в глубине стекломассы.

Поскольку позволяли длина и конструкция прибора и просвет отверстий в стенках, не могущих быть увеличенными, в варочном бассейне намечено 5 плоскостей, проходящих перпендикулярно длинной оси печи (поперек ванны) на расстоянии 620—660 мм друг от друга.

В пределах плоскости намечено 5 точек: 2 у краев, на расстоянии 80 мм от правой и 170 мм от левой стены, затем 1 в плоскости продольной оси печи и 2 на расстоянии 580 и 420 мм от краев (правой и левой стены).

К сожалению, замерить 5 точек во всех плоскостях не удалось вследствие неудачного расположения окна, так что в плос-

костях за № 2, 3 и 5 пришлось ограничиться только тремя точками: одной посредине и двумя боковыми на расстоянии 500 мм от оси печи (580 и 420 мм от стен).

По глубине намечено было 4 горизонта на расстояниях 80, 200, 450 и 700 мм от зеркала стекломассы.

Вместе с этим необходимо указать, что в смысле расположения однородных точек плоскости по одной вертикали пришлось допустить некоторое искажение правильности задуманной пространственной сетки, именно: в самом верхнем горизонте точки оказались фактически несколько смещенными в пределах 20—50 мм. Таким образом получилась пространственная сетка, в которой 95 узловых точек подвергались температурному изучению.

Следует считать, что это количество их, принимая во внимание небольшой размер бассейна, является достаточным для суждения о глубинных изотермах в стекломассе.

Значительная недоступность выработочной камеры, отсутствие в ней широких отверстий позволили замерить температуру в глубине стекломассы лишь по двум плоскостям, расположенным на расстоянии 50 и 300 мм от моста. Поперек ванны замерены в первой плоскости 3 точки, расположенные аналогично точкам в плоскости варочного бассейна, а во второй 1 точка — по оси ванны.

По глубине здесь удалось зафиксировать 3 горизонта по первой и 5 горизонтов по второй плоскостям, на расстояниях: в первой — 0, 100 и 200 мм от горизонта зеркала и во второй — 0, 50, 250, 450 и 200 мм от зеркала стекла.

Таким образом в выработочном бассейне измерены температуры в $9 + 5 = 14$ точках, а во всей ванне в $95 + 14 = 109$ точках. С учетом связи глубинных изотерм с температурами газа в варочной части были измерены также температуры в контрольной точке бассейна — по осевой плоскости, в середине длины свода. Эти температуры непосредственно фиксировались самопишущим аппаратом, связанным с платино-платинородиевой термопарой.

Техника глубинного пирометража заключалась в последовательном введении через окна в боковых стенках дугообразного прибора с платино-платинородиевой термопарой на конце. Путем отметки расстояния на дуге прибора и подвешивания последнего на блоке определялись координаты погружения термопары при помощи системы линеек. Последовательно измерялись точки, лежащие на одном горизонте, причем запись температуры производилась при наступлении постоянной температуры (в течение 2—3 сек.) В плоскостях, лежащих между окнами, измерение производилось по вертикали.

Каждая результативная цифра, служащая в дальнейшем величиной, характеризующей тепловое состояние данной точки, является средней из ряда наблюдений.

Так как приходилось считаться с тем, что горячий спай термопары проходил незащищенным через газовую зону, температура в которой была значительно выше температуры стекломассы и которая обладала науглероживающим действием (близость неф-

тяного факела), то через несколько измерений температура менялась и подвергалась новой проверке и калибровке. Поэтому погрешность измерений за счет науглероживания в данном исследовании следует считать доведенной до минимума.

Методы манипулирования с глубинным пирометражем были согласованы с проф. Бромлеем, давшим целый ряд ценных методических указаний.

V. Распределение температур в стекломассе

A. Распределение температур вдоль длинной оси печи

Согласно принятым плоскостям, в которых располагались точки, подвергшиеся температурному изучению, явилось возможным определить изменение температур вдоль ванны в 5 продольных плоскостях и на 4 горизонтах, причем по точкам №1 и 5 (см. чертеж: план печи) температура измерялась только в 2 поперечных плоскостях (1-й и 4-й); таким образом полная продольная температурная характеристика получена лишь для 3 продольных сечений.

1. По центральной осевой плоскости (центральное продольное сечение). Температура вдоль ванны по различным горизонтам падает неравномерно (рис. 4) на верхнем горизонте (80 мм от поверхности); максимум температуры приходится в плоскости 1-го поперечного сечения, а минимум — в плоскости 3-го поперечного сечения; наблюдается равномерное падение на 50° , что соответствует удельному падению $50^\circ/1\text{ м}$. Далее температура поднимается на 30° в плоскости 4-го поперечного сечения и затем опять снижается на 20° .

Вторичный подъем температуры следует отнести за счет поддержки факела пламени опущенной секцией свода.

Ближе к мосту, отделяющему варочный бассейн от выработочного, температура снижается резче, давая удельное падение $100^\circ/1\text{ м}$ длины бассейна.

Такой же характер изменения температур зафиксирован и на наиболее глубоком — 4-м горизонте: от 1-го до 3-го поперечного сечения температура равномерно падает с 1230 до 1160° , т. е. $55^\circ/1\text{ м}$ длины, а далее наблюдается подъем на 35° и спуск в плоскости 5-го поперечного сечения на те же 35° . Однако дальнейшее изменение температуры вдоль оси на этой глубине уже иное: перешеек не оказывает охлаждающего влияния на глубинный поток стекломассы, температура которого в выработочной части снижается лишь на $5^\circ/1\text{ м}$ длины.

Объяснение в совпадении изменений температур на столь различных горизонтах следует искать в явлениях поперечных потоков, опускающихся у стен и поднимающихся вдоль осевой плоскости ванны. Этому толкованию соответствует и характер распределения температур по двум средним горизонтам. Абсолютные значения этих температур являются средними, а изменения их, свидетельствуя о наличии уравнительного влияния продольных и поперечных потоков, подтверждают общую схему. Однако следует отметить, что изменения температур по 2-му горизонту, начиная от плоскости 4-го сечения, противоположны изменению

температур верхнего (1-го) и самого нижнего (4-го) горизонтов: температура изменяется в сторону повышения (на 15°) до 5-го поперечного сечения, и затем медленно падает по направлению к выработочному бассейну ($15^\circ/1 \text{ м}$).

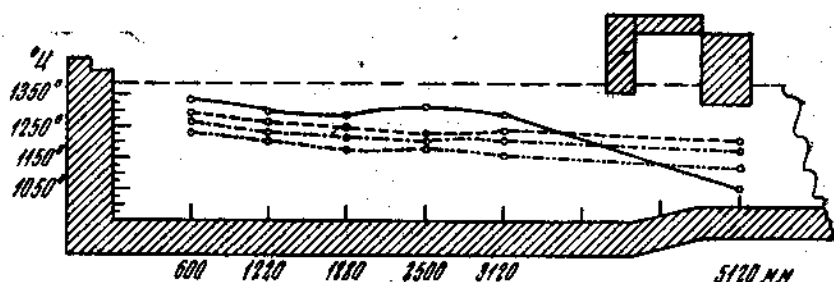


Рис. 4. Распределение температур в стекломассе вдоль ванны на различных глубинах (центральная осевая плоскость).

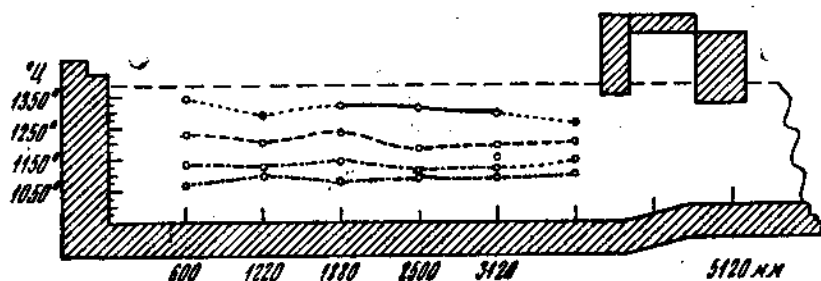


Рис. 5. Распределение температур в стекломассе вдоль ванны на различных глубинах (боковая правая линия).

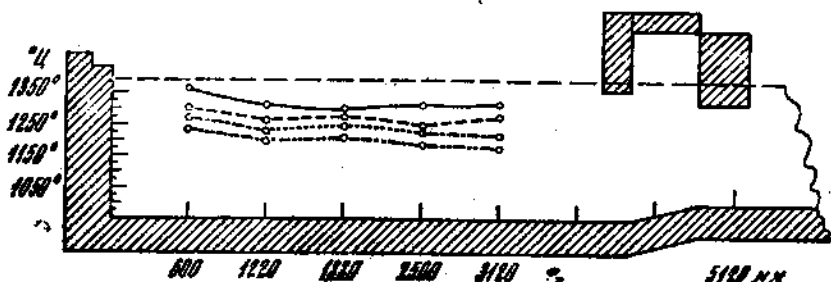


Рис. 5а. Распределение температур в стекломассе вдоль ванны на различных глубинах (боковая левая линия).

3-й горизонт подъема температур не имеет и дает непрерывное падение разной интенсивности в общем на 50° или $10^\circ/1 \text{ м}$.

2. По боковым осевым плоскостям. Здесь более детально изучены две плоскости на расстоянии от средней продольной линии печи на 500 мм вправо и влево. Две другие боковые плоскости имеют меньше число точек (на 60% меньше) и находятся на разных расстояниях от стен и оси симметрии печи. При анализе температурного распределения в боковых плоскостях (рис. 5)

необходимо обратить внимание на положение пламени. Если бы можно было доказать, что максимальная температура факела находится как раз на повороте его и совпадает со средней осевой плоскостью печи и что подъем температуры до указанного максимума и снижение ее до выхода печных газов идентичны, то распределение температур в стекломассе в обеих боковых продольных плоскостях было бы одинаковым. Однако такое доказательство в данном случае отсутствует, и приходится допустить наличие температурной асимметрии газового пространства, обуславливающего и асимметрию распределения температур в самой стекломассе, по правую и левую сторону от осевой плоскости.

В поверхностных слоях (горизонт 1-й) существенной разницы между температурами стекломассы правой и левой стороны ванны не замечается. Сопоставляя серию кривых в одной продольной плоскости — справа и слева — по всему вертикальному сечению, легко заключить, что в общем левая сторона (считая лицо наблюдателя обращенным в сторону движения продольного потока стекломассы) ванны нагрета сильнее правой. Более детальное и количественное сравнение провести не удастся, поскольку совокупность наблюдений не включает всех температурных данных по выбранным точкам относительно положения горелки.

Ориентируясь на аналогичный характер измерений, следует сказать, что удельная величина падения температур вдоль ванны по боковым плоскостям получится:

1-й горизонт — на протяжении первых 2 м — $35^{\circ}/1$ м, далее падение становится весьма незначительным — $5-15^{\circ}/1$ м;

2-й горизонт — первые 2 м — $18^{\circ}/1$ м, далее $5-10^{\circ}/1$ м;

3-й и 4-й горизонты не характеризуются определенным изменением температур по длине. Колебания их заключаются в пределах $30-40^{\circ}$, причем необходимо отметить, что глубинные температуры (3-й и 4-й горизонты) левой стороны значительно ниже правой.

Температуры, конечные по указанным кривым, т. е. температуры точек, находящихся под опущенной секцией свода, около моста, не являются симметричными справа по всем 3 горизонтам: температура колеблется здесь между 1210 и 1240° , тогда как слева амплитуда расширяется до 110° ($1270-1160^{\circ}$). Объяснения этому следует искать в положении пламени: указанные значения температур наблюдаются на правой стороне при горелке слева и на левой стороне при горелке также слева. Иными словами, при повороте пламени температура падает настолько, что на протяжении 1 м (поперек ванной печи) температура верхних слоев стекломассы опускается с 1270 до 1240° ; 2-й горизонт остается стабильным, а 3-й и 4-й представляют обратную картину: над горячей частью факела 1190 и 1160° ; а под охладившейся — 1240 и 1210° .

В отношении крайних точек, находящихся на расстоянии 80 и 170 мм от продольных стен, правой и левой, можно указать лишь общее изменение температур на промежутке между 1-м и 4-м

поперечными сечениями, так как в остальных — 2-м, 3-м и 5-м — сечениях конфигурация прибора и ванны не позволили измерить температуру соответствующих точек.

Поверхностная температура (1-й горизонт) у правой стенки падает с 1290 до 1275° . Следует помнить при этом, что первое показание снято под факелом, входящим в печь, а второе — под факелом, выходящим из печи. Учитывая развитие температур в самом факеле, при его полете над стекломассой, можно считать, что температура у продольной стенки почти не меняется.

У левой стены положение иное: температура здесь падает с 1305 до 1285° . Учитывая, что температура точки по 1-му поперечному сечению взята на обратном ходе дыма, а по 4-му — на входящем факеле, следует считать падение равным $30\text{--}40^{\circ}$.

Во 2-м горизонте падение температуры резче:

$$\begin{aligned} &\text{с правой стороны} \text{---} 1260 \text{---} 1210 = 50^{\circ}, \\ &\text{с левой стороны} \text{---} 1280 \text{---} 1240 = 40^{\circ}. \end{aligned}$$

Если исходить из соображения одинакового пламенного режима для всех указанных точек, то разница справа должна уменьшиться, а слева — увеличиться, так что следует полагать, что на этом горизонте температурной асимметрии нет. Абсолютное падение равно здесь $\sim 20^{\circ}/\text{м}$ длины ванны.

Следующие горизонты — 3-й и 4-й — справа не обнаруживают никакого изменения температур, давая 1200° в обоих сечениях, т.е. падение температуры по длине не происходит, а слева падение заметно:

$$\begin{aligned} &\text{по 3-му горизонту} \text{---} \text{с } 1230 \text{ до } 1210^{\circ}, \text{ т. е. на } 15^{\circ}/\text{м}, \\ &\text{„ 4-му „ „ „ „ } 1200 \text{ „ } 1208^{\circ} \text{ „ „ на } 6^{\circ}/\text{м}. \end{aligned}$$

Последние температуры относятся к одному и тому же положению факела.

Б. Распределение температур в поперечном направлении

Как уже указано, температура стекломассы в поперечном направлении изучена в 5 плоскостях на 4 горизонтах.

1-е поперечное сечение — на расстоянии 600 мм от передней стенки бассейна. Распределение температуры (рис. 6) по верхнему горизонту волнообразное — с двумя максимумами по боковым продольным плоскостям. Амплитуда температур — $50\text{--}60^{\circ}$ за счет непосредственного влияния лучеиспускания пламени, так как вдоль средней оси ванны температура ниже на $20\text{--}40^{\circ}$.

2-й горизонт не обнаруживает уже влияния лучеиспускания факела. Это заставляет предположить, что на глубине 200 мм происходит вероятно поглощение лучистой теплоты пламени, что в связи с уравнивающим действием поперечных потоков срезывает пику температурных кривых, ясно обнаруживаемых в поверхностных слоях стекломассы. Однако с точки зрения боковой симметрии на уровне данного горизонта обнаруживается более

сильное охлаждение правой стороны бассейна на 20° . Эта же асимметрия, в сущности, намечается уже в поверхностных слоях ($1305 - 1290 = 15^\circ$). Вместе с тем температурная кривая верхнего горизонта дает интересное указание на совпадающий темпе-

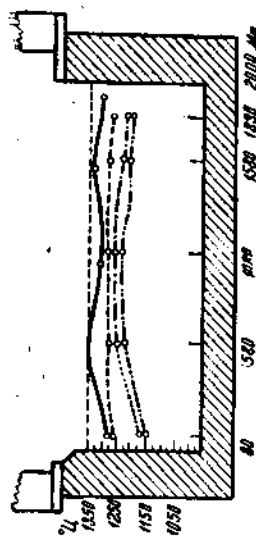


Рис. 6. Распределение температур поперек ванной печи на различных глубинах (по поперечной линии I).

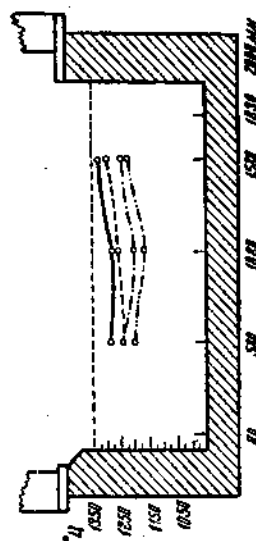


Рис. 6б. Распределение температур поперек ванной печи на различных глубинах (по поперечной линии III).

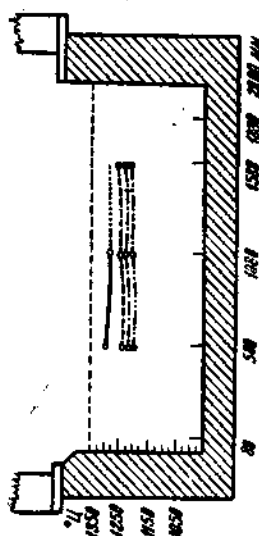


Рис. 6а. Распределение температур поперек ванной печи на различных глубинах (по поперечной линии II).

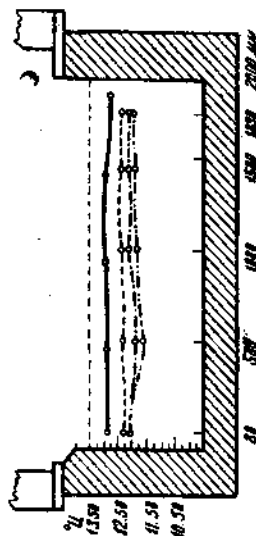


Рис. 6в. Распределение температур поперечной ванной печи на различных глубинах (по поперечной линии IV).

ратурный режим входящего пламени и выходящего дыма в плоскости рассматриваемого поперечного сечения. 3-й и 4-й горизонты дают весьма близкие температурные значения, максимум которых ($1230 - 1270$) совпадает с осевой продольной плоскостью ванны.

Температуры у боковых стен совпадают: справа — точно, а слева — с разницей температур всего в $10^{\circ}/1\text{ м}$.

Но и в этих горизонтах еще отражается указанная асимметрия. Левая половина стекломассы горячее правой (на $20\text{--}30^{\circ}$). Температурный перепад на этих горизонтах наиболее резкий: $70^{\circ}/1\text{ м}$ справа и $50^{\circ}/1\text{ м}$ слева. Точно установить величину перепада на основе собранного материала все же нельзя, ибо не имеется полного комплекса температуры данных, соответствующих различному положению факела.

2-е поперечное сечение охарактеризовано не по всей ширине бассейна. Однако приведенных данных достаточно, чтобы фиксировать принципиальную разницу в распределении температур в данном сечении (рис. 6а) и 1-м; кроме того все температурные значения приурочены к совпадающему положению факела (все температуры определены под дымом — на обратном ходу печных газов).

Верхний горизонт дает максимум (1300°) на расстоянии 580 мм от правой боковой стенки (правая продольная плоскость).

В плоскости осевой — температура 1290° , далее влево температура падает довольно резко, и следовало бы ожидать у левой стены температуру в $1230\text{--}1240^{\circ}$; вправо падение меньше и должно быть примерно $1250\text{--}1260^{\circ}$.

2-й горизонт дает ту же картину, что и в 1-м сечении, обнаруживая максимум температуры у левой стены (1260° на расстоянии 420 мм от стены).

Ту же тенденцию проявляют и температурные кривые 3-го и 4-го горизонтов, дающих максимальные температуры у левой стены. В этом — принципиальное отличие распределения температур в данном сечении по сравнению с 1-м, где эти горизонты характеризуются максимумом температуры в средней зоне стекломассы. Удельный подъем температур здесь — порядка $19\text{--}20^{\circ}/1\text{ м}$ ширины.

3-е сечение характеризуется также весьма своеобразным распределением температур. Максимумы температур (рис. 6б) приходятся ближе к стенам (580 мм от правой и 420 мм от левой стены), причем по всем горизонтам эта тенденция выражена одинаково, так что кривые располагаются почти параллельно друг другу. Все температурные значения сняты под пламенем (входящие печные газы). Падение температуры на протяжении $0,5\text{ м}$ — начиная с верхнего горизонта — $45, 40, 30$ и 60° . Очевидно на этом поперечном сечении температура факела получает свое наибольшее значение. Это сказывается в увеличении температуры верхних слоев стекломассы (как раз под горячим газовым потоком), не снижаемой отрицательным воздействием холодных присосов воздуха через боковые стенки, что может иметь место в области 1-го и 2-го поперечного сечения. Не совсем выясненным остается повышение температур по направлению к стенкам в глубинных зонах (3-го и 4-го горизонтов): повидимому здесь создаются или вступают какие-то более горячие потоки, направляющиеся от оси к периферии (к определенным стенкам).

4-е сечение — иллюстрирует распределение температур (рис. 6в), которое можно было бы, при введении в полученные значения известных поправок, экстраполируя температуры правой части ванны в положении факела входящего, изобразить серией горизонтальных изотерм.

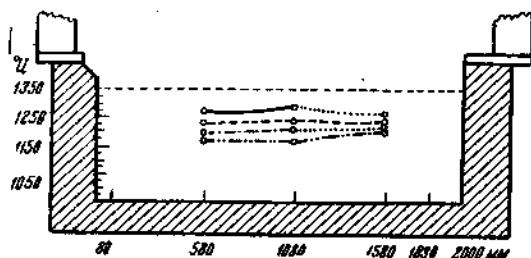


Рис. 6в. Распределение температур поперек ванной печи на различных глубинах (по поперечной линии V).

и если внести поправки на температуры у левой стены, то характер кривых будет идентичным с кривыми по 4-му сечению (рис. 6г). Максимум температур по 1-му и 2-му горизонтам проходит вдоль продольной оси ванны. При этом 2 нижних горизонта (3-й и 4-й) дают повышение температуры к левой стене, что может происходить за счет ошибочного вовлечения вместе с прибором слоя стекломассы из верхних слоев.

Температурный ингредиент падения поперек ванны здесь весьма невелик и измеряется $10\text{--}20^\circ/1\text{ м}$.

В. Глубинное распределение температур

Анализ стратиграфического распределения температур в стекломассе поможет выяснить ряд вопросов, связанных с определением путей потоков, а также установить картину и степень теплопередачи через самую стекломассу. Это последнее обстоятельство в связи с различной лучепрозрачностью и теплопроводностью стекломассы является весьма важным, так как характеризует теплотехнические условия варки стекла, по которым следует ориентировать тепловой режим газового потока печных газов, характер его (сечение), а также конфигурацию бассейна, влияющую на схему образующихся термических потоков в самой стекломассе. Поскольку горизонтальное распределение температур уже рассмотрено путем сопоставления различ-

Верхний горизонт имеет весьма небольшой максимум в центре (осевая плоскость) — $13\ 000^\circ$, к боковым стенкам эта температура падает на $15\text{--}20^\circ$.

2-й горизонт имеет максимумы у стен (1240°), 3-й и 4-й горизонты по температурам совпадают.

5-е сечение в основном весьма похоже на 4-е,

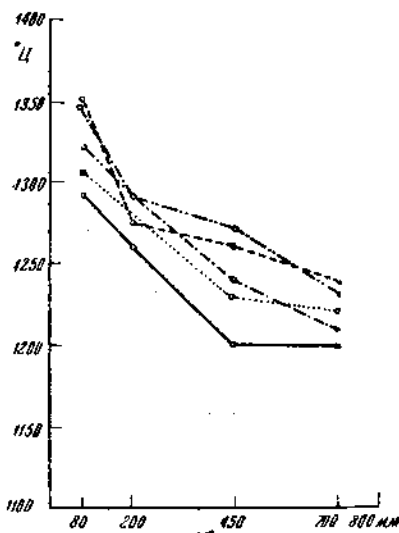


Рис. 7. Распределение температур по глубине стекломассы (сечение 1).

ных вертикальных сечений, как продольных, так и поперечных, изменение температур на вертикали будет проанализировано с точки зрения падения температуры по одной вертикальной линии:

1. Первое поперечное сечение (рис. 7)

На глубине 620 мм (от 80 до 700 мм) температура падает:

по вертикали № 5	на	1290 — 1200 = 90°
" "	№ 4	" 1350 — 1240 = 110°
" "	№ 3	" 1340 — 1230 = 110°
" "	№ 2	" 1320 — 1210 = 110°
" "	№ 1	" 1305 — 1220 = 85°.

Иными словами, крайние точки показывают минимальные падения:

$$\begin{aligned} \text{справа (№ 5)} & \dots \frac{90}{62} = 1,5^\circ/\text{см}, \\ \text{слева (№ 1)} & \dots \frac{85}{62} = 1,4^\circ/\text{см}, \\ \text{средние (№ 4, 3 и 2)} & \dots \frac{110}{62} = 1,8^\circ/\text{см}. \end{aligned}$$

Падение температуры неравномерно, по вертикалям № 5, 1 и 2, на глубине 37 мм температура снижается:

$$\begin{aligned} \text{№ 5} & \dots \text{на } \frac{1210 - 1200}{37} = 2,5^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 1} & \dots \text{на } \frac{1305 - 1230}{37} = 2,0^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 2} & \dots \text{на } \frac{1320 - 1240}{37} = 2,1^\circ/\text{см}. \end{aligned}$$

На глубине последующих 25 см:

$$\begin{aligned} \text{№ 5} & \dots \text{на } \frac{1200 - 1200}{25} = 0,0^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 1} & \dots \text{на } \frac{1230 - 1220}{25} = 0,4^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 2} & \dots \text{на } \frac{1240 - 1210}{25} = 1,2^\circ/\text{см}. \end{aligned}$$

По вертикалям № 3 и 4 на глубине 37 мм температура снижается:

$$\begin{aligned} \text{№ 3} & \dots \text{на } \frac{1340 - 1270}{37} = 1,9^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 4} & \dots \text{на } \frac{1350 - 1260}{37} = 2,4^\circ/\text{см}. \end{aligned}$$

На глубине последующих 25 см:

$$\begin{aligned} \text{№ 3} & \dots \text{на } \frac{1270 - 1230}{25} = 1,6^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 4} & \dots \text{на } \frac{1260 - 1240}{25} = 0,8^\circ/\text{см}. \end{aligned}$$

Таким образом среднее падение температур по всем вертикалям 1-го поперечного сечения на глубине 37 см будет $\cong 2,2^\circ/1 \text{ см}$.
 На последующие 25 см $\cong 0,8^\circ/1 \text{ см}$.
 А в среднем на всю глубину — 62 см:

$$\frac{1,5 + 1,4 + 3 \times 1,8}{5} \cong 1,7^\circ \text{ см.}$$

В верхних горизонтах удельное падение колеблется в пределах $1,9 - 2,5^\circ/\text{см}$, т.е. 20% от средней величины; в нижних горизонтах разница доходит до 100%, главным образом в вертикалях, ближайших к наружным стенкам.

Второе поперечное сечение (рис. 8)

На глубине в 620 мм падение температуры равно по вертикалям:

№ 4 $1300 - 1200 = 100^\circ$, что дает удельное падение $1,6^\circ/\text{см}$

№ 3 $1290 - 1203 = 87^\circ$ " " " " $1,4^\circ/$ "

№ 2 $1260 - 1220 = 40^\circ$ " " " " $0,6^\circ/$ "

Падение неравномерно, и, повидимому, измерение по вертикали № 2 нуждается в корректировании, производя его, получаем в среднем $1,5^\circ/\text{см}$.

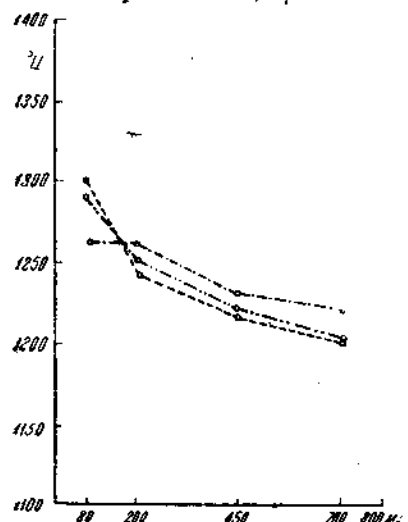


Рис. 8. Распределение температур по глубине стекломассы (сечение II).

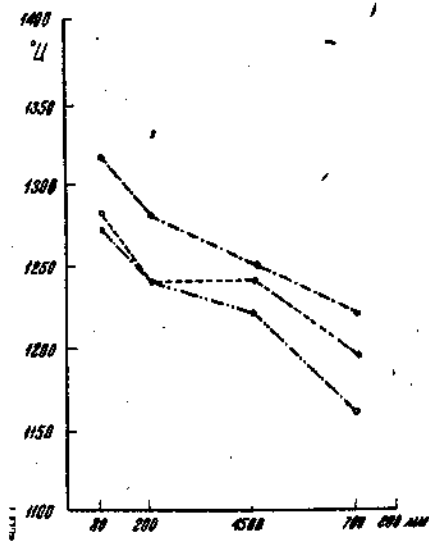


Рис. 9. Распределение температур по глубине стекломассы (сечение III).

На глубине 37 см удельное падение равно по вертикалям:

$$\left. \begin{array}{l} \text{№ 4} \dots\dots\dots \frac{1300 - 1215}{37} = 2,3^\circ/\text{см} \\ \text{№ 3} \dots\dots\dots \frac{1290 - 1220}{37} = 1,9^\circ/\text{см} \\ \text{№ 2} \dots\dots\dots \frac{1260 - 1230}{37} = 0,8^\circ/\text{см} \end{array} \right\} \text{В среднем } 1,7^\circ/\text{см.}$$

На последующие 25 см вертикали:

$$\left. \begin{array}{l} \text{№ 4} \dots\dots\dots \frac{1215 - 1200}{25} = 0,6^\circ/\text{см} \\ \text{№ 3} \dots\dots\dots \frac{1220 - 1203}{25} = 0,7^\circ/\text{см} \\ \text{№ 2} \dots\dots\dots \frac{1230 - 1220}{25} = 0,4^\circ/\text{см} \end{array} \right\} \text{ В среднем } 0,6^\circ/\text{см}.$$

На всю глубину в среднем $\cong 1,2^\circ/\text{см}$.

Колебание отдельных значений доходит до 50% от средней величины.

Третье поперечное сечение (рис. 9)

На глубине в 620 мм падение температуры равно по вертикалям:

$$\begin{array}{l} \text{№ 4} \dots\dots\dots 1280 - 1195 = 85^\circ; \frac{85}{62} = 1,4^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 3} \dots\dots\dots 1270 - 1160 = 110^\circ; \frac{118}{62} = 1,8^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 2} \dots\dots\dots 1315 - 1220 = 95^\circ; \frac{95}{62} = 1,5^\circ/\text{см}. \end{array}$$

На глубине первых 37 см по вертикалям:

$$\left. \begin{array}{l} \text{№ 4} \dots\dots\dots \frac{1280 - 1240}{37} = 1,1^\circ/\text{см} \\ \text{№ 3} \dots\dots\dots \frac{1270 - 1222}{37} = 1,4^\circ/\text{см} \\ \text{№ 2} \dots\dots\dots \frac{1315 - 1250}{37} = 1,8^\circ/\text{см} \end{array} \right\} \text{ В среднем } 1,4^\circ/\text{см}.$$

На глубине последующих 25 см по вертикалям:

$$\left. \begin{array}{l} \text{№ 4} \dots\dots\dots \frac{1240 - 1195}{25} = 1,8^\circ/\text{см} \\ \text{№ 3} \dots\dots\dots \frac{1220 - 1160}{25} = 2,4^\circ/\text{см} \\ \text{№ 2} \dots\dots\dots \frac{1250 - 1220}{25} = 1,2^\circ/\text{см} \end{array} \right\} \text{ В среднем } 1,8^\circ/\text{см}.$$

На всю глубину в 62 см — среднее падение — $1,6^\circ/\text{см}$.

Колебание от среднего значения не превышает 10—15%.

Четвертое поперечное сечение (рис. 10)

На глубине в 62 см падение по всем 5 вертикалям будет:

$$\begin{array}{l} \text{№ 5} \dots\dots\dots 1275 - 1200 = 75^\circ; \frac{75}{62} = 1,2^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 4} \dots\dots\dots 1280 - 1170 = 110^\circ; \frac{110}{66} = 1,8^\circ/\text{см}, \end{array}$$

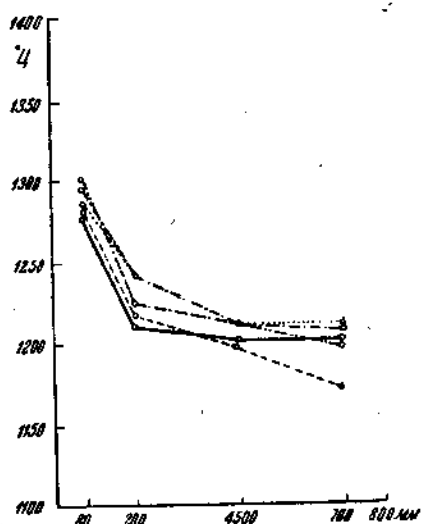


Рис. 10. Распределение температур по глубине стекломассы (сечение IV).

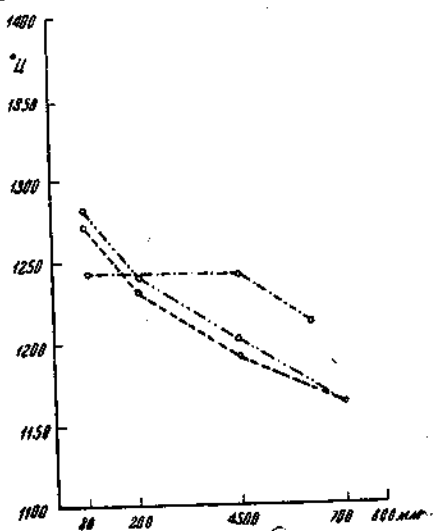


Рис. 11. Распределение температур по глубине стекломассы (сечение V).

$$\text{№ 3} \dots\dots\dots 1300 - 1195 = 105^\circ; \frac{105}{62} = 1,7^\circ/\text{см},$$

$$\text{№ 2} \dots\dots\dots 1295 - 1205 = 90^\circ; \frac{90}{62} = 1,5^\circ/\text{см},$$

$$\text{№ 1} \dots\dots\dots 1285 - 1208 = 77^\circ; \frac{77}{62} = 1,2^\circ/\text{см}.$$

Падение имеет симметричный характер: у стен — $1,2^\circ/\text{см}$, в средней зоне между $1,5$ и $1,8^\circ/\text{см}$ в среднем $\sim 1,7^\circ/\text{см}$.

По всем 5 вертикалям средний температурный градиент равен $1,5^\circ/\text{см}$.

Колебания отдельных значений здесь $\pm 25\%$ от средней величины.

Интенсивность падения температур по глубине разная; в пределах первых 37 см удельное падение температур по вертикалям получается:

$$\text{№ 5} \dots\dots\dots \frac{1275 - 1200}{37} = 2^\circ/\text{см},$$

$$\text{№ 4} \dots\dots\dots \frac{1280 - 1195}{37} = 2,3^\circ/\text{см},$$

$$\text{№ 3} \dots\dots\dots \frac{1300 - 1210}{37} = 2,4^\circ/\text{см},$$

$$\text{№ 2} \dots\dots\dots \frac{1295 - 1210}{37} = 2,3^\circ/\text{см},$$

$$\text{№ 1} \dots\dots\dots \frac{1285 - 1210}{37} = 2,0^\circ/\text{см}.$$

В среднем в указанной зоне $\sim 2,2^\circ/\text{см}$.

В последующих 25 см по глубине падение по вертикалям замедляется:

$$\begin{aligned}\text{№ 5} & \dots\dots\dots \frac{1200 - 1200}{25} = 0,0^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 4} & \dots\dots\dots \frac{1195 - 1170}{25} = 1,0^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 3} & \dots\dots\dots \frac{1210 - 1195}{25} = 0,6^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 2} & \dots\dots\dots \frac{1210 - 1205}{25} = 0,2^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 1} & \dots\dots\dots \frac{1210 - 1208}{25} = 0,1^\circ/\text{см}.\end{aligned}$$

В среднем $\sim 0,4^\circ/\text{см}$; обращает на себя внимание замедление падения у вертикалей, ближайших к наружным стенам.

Пятое поперечное сечение (рис. 11)

Характеризуется сильным отклонением по вертикали № 2 (левая продольная плоскость).

На глубине в 2 см градиент падения температур по вертикалям следующий:

$$\begin{aligned}\text{№ 4} & \dots\dots\dots 1270 - 1160 = 110^\circ; \frac{110}{62} = 1,8^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 3} & \dots\dots\dots 1280 - 1160 = 120^\circ; \frac{120}{62} = 2,0^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 2} & \dots\dots\dots 1240 - 1210 = 30^\circ; \frac{30}{62} = 0,5^\circ/\text{см}.\end{aligned}$$

В среднем $1,4^\circ/\text{см}$.

Весьма сильное отклонение по вертикали № 2 не позволяет безоговорочно принять исчисленную среднюю; исключая ее, получаем среднюю $1,9^\circ/\text{см}$, что весьма сходно с предыдущими данными.

На глубине 37 см по вертикалям:

$$\begin{aligned}\text{№ 4} & \dots\dots\dots \frac{1270 - 1190}{37} = 2,2^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 3} & \dots\dots\dots \frac{1280 - 1200}{37} = 2,2^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 2} & \dots\dots\dots \frac{1240 - 1240}{37} = 0,0^\circ/\text{см}.\end{aligned}$$

Корректированная средняя $\sim 2,0^\circ/\text{см}$ (№ 2 почти везде отстаёт).

На глубине последующих 25 см по вертикалям:

$$\begin{aligned}\text{№ 4} & \dots\dots\dots \frac{1190 - 1160}{25} = 1,2^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 3} & \dots\dots\dots \frac{1200 - 1160}{25} = 1,6^\circ/\text{см}, \\ \text{№ 2} & \dots\dots\dots \frac{1240 - 1210}{25} = 1,2^\circ/\text{см}.\end{aligned}$$

В среднем $\sim 1,3^\circ/\text{см}$.

Колебание не превышает $\pm 20\%$ от среднего значения.
Резюмируем данные в следующей таблице:

Т а б л и ц а 26

Поперечные сечения	Средн. температура на глубине 62 см	Девияция (в %)	Средн. температура на глубине 25 см	Девияция (в %)	Средн. температура на глубине 37 см	Девияция (в %)	Примечание
Первое . .	1,7°	20	2,2°	10	0,8°	100	Наиболее сильное отклонение у № 1, 5
Второе . .	1,2°	50 20	1,7°	50 15	0,6°	30	Корректиров. дает 1,5 °/см Корректиров. дает 2,0 °/см
Третье . .	1,6°	15	1,4°	25	1,8°	30	Наиболее сильное отклонение значения № 1 и 5
Четвертое .	1,5°	25	2,2°	10	0,4°	150	
Пятое . . .	1,4°	65 (10)	1,5°	100 (10)	1,3°	20	Корректиров. дает 1,9 °/см Корректиров. дает 2,0 °/см
В средн. . .	1,5 °/см	—	1,8 °/см	—	1,0 °/см	—	

VI. Результаты и выводы по исследованию

А. На основе разобранного материала и полученных данных делаем следующие выводы: Распределение температур вдоль бассейна — по трем основным продольным плоскостям

1) Наблюдается два максимума — первый у самых влетов горелок, на расстоянии до 600 мм от стенок, и второй на расстоянии 2—2,5 м от той же стены, причем в расположении этих температур отражается влияние формы факела: боковые зоны имеют максимум ближе 2 м (в 3-й поперечной плоскости), а по центральной оси максимум отодвигается до 2,5 м (до 4-й поперечной плоскости).

Поворот факела здесь обусловлен присутствием пониженной секции свода. Минимумы температур располагаются на расстоянии 1,2 м от горелочной стены и далес — за пониженной частью свода. То обстоятельство, что минимум не лежит в плоскости 1-го поперечного сечения (на расстоянии 600 мм от стенки), должно быть объяснено сильным лучеиспусканием этой частью свода, перегревающей стекломассу — даже на периоде отходящих газов.

Изменение температур по отдельным горизонтам в основном совершается по вышеуказанному, т. е. изотермы здесь идут параллельными пучками.

2) Падение температур вдоль ванны может быть охарактеризовано цифрами:

по средней линии: от 0,6 до 2 м — $50^{\circ}/1$ м,

„ 2,5 „ 4 м — $20^{\circ}/1$ м,

по боковым продольным: от 0,6 до 2,0 — $25^{\circ}/1$ м,

„ 2,5 „ 4,0 — $28^{\circ}/1$ м.

Необходимо указать, что падение температуры в этих боковых продольных плоскостях зависит от положения пламени: на дымку падение меньше, чем на пламени.

3) Асимметрия в распределении температур выражается в большей нагретости левой половины ванны (учитывая положение пламени). Это явление следует объяснить положением ванны в цехе, которое обуславливает более интенсивное охлаждение конвекционными воздушными потоками правой стенки бассейна.

Б. Распределение температур поперек бассейна

1) Характер изменения температур зависит от положения поперечной плоскости. 1-е поперечное сечение имеет 2 максимума; как раз под факелами пламени 2-е, 3-е, 4-е и 5-е сечения иллюстрируются температурными кривыми, имеющими 1 минимум — в средней зоне печи, причем по отдельным горизонтам общая картина сохраняется, так что изотермы имеют вид параллельных кривых. 5-е поперечное сечение не имеет заметного максимума или минимума.

2) Изменение температуры от осевой части ванны к стенкам характеризуется:

по 1-му сечен.— падением на $50^{\circ}/1$ м ширины

„ 2-му „ — подъемом „ $15-20^{\circ}/1$ „ „

„ 3-му „ — „ „ $40-50^{\circ}/1$ „ „

„ 4-му „ — падением „ $10-15^{\circ}/1$ „ „

„ 5-му „ — температура заметно не меняется

Такая разница в характере изменения происходит, по видимому, за счет возникновения в средней части бассейна диагонально направленных потоков, снижающих температуру осевой зоны ванны.

3) Асимметрия в температурах правой и левой части бассейна здесь выступает довольно резко (1-е, 2-е и 3-е сечения) и дает представление об охлаждающем влиянии окон (в стенах бассейна).

В. Распределение температур по глубине

1) Температурный градиент по глубине является различным в зависимости главным образом от горизонта стекломассы. В то время как средняя величина градиента на протяжении 62 см колеблется в пределах $1,2^{\circ}$ до $1,7^{\circ}/1$ см (резче всего в плоскости 1-го поперечного сечения) на расстоянии 0,6 м от стенки и меньше всего — на расстоянии 1,2 м (второе сечение), — падение температуры на глубинах в 37 см и последующих в 25 см отличается значительно: среднее значение на первой глубине — $1,8^{\circ}/\text{см}$, на второй — $1,0^{\circ}/\text{см}$. Такая большая разница позволяет заключить,

что интенсивный теплообмен и связанные с ним потоки в сильной степени затухают на глубине до 37 см.

Таким образом при толщине стекломассы в 0,8 м интенсивные потоки затухают на глубине 0,45 м, и следовательно самые глубокие слои являются сравнительно инертными, неподвижными. До них лучистая теплота свода и пламени уже не доходит, поглощаясь вышележащими слоями стекломассы. По данным М. Коуля падение температуры в поверхностных слоях стекломассы при температуре 1340° достигает 2,5° F на 1 дюйм, т. е. на 1 см 0,25° C. Измерения проф. Бромлея в канале Фурко, т. е. при температуре ~1000°, дают инградиент 1°/1 см.

В заключение следует упомянуть о небольшом дополнительном изменении температур в выработочной части ванны.

Здесь измерены температуры вдоль поперечной плоскости около самого моста на 3 горизонтах с поверхности, на глубине 100 и 200 мм.

Далее — по середине камеры, по оси печи, по 1-й вертикали измерены температуры на 5 горизонтах — на поверхности и на глубинах в 50, 250, 450 и 650 мм от зеркала стекломассы.

Поперек выработочного бассейна температура поверхности стекла падает весьма резко — с 1210 до 1005°, т. е. на 105°, на протяжении 0,55 м. Такое резкое остывание обусловлено наличием открытого окна.

На глубине 100 мм падение весьма скромное — с 1240 до 1200° — 40° на 0,55 м, а на глубине 200 мм замечается уже стабилизация температуры (1230—1230°), указывающая на то, что на глубине 0,2 м охлаждающее влияние газового пространства над зеркалом уже парализовано, а изоляция стеновых брусьев оказывается вполне достаточной для удержания нагрева стекломассы на том уровне, который является характерным для ее средних зон.

Представляется оригинальным глубинное распределение температур в центре выработочного бассейна (между мостами).

На протяжении 0,25 м вглубь температура поднимается на 170° (1210—1040°), т. е. почти на 7°/1 см. На протяжении последующих 0,4 м температура медленно снижается на 60°, давая градиент падения температуры 1,5°/1 см, аналогичный полученному градиенту для варочного бассейна.

Отсюда вывод, что в центральной части выработочной камеры охлаждение захватывает более глубокие слои, чем у стен; необходимо учесть здесь и влияние направления выработочного потока, подходящего под лодочку.

VII. Анализ графиков изотерм

Полученный за счет имевшегося цифрового материала комплект графиков изотерм, изображенных на плоскости, отнесенной к вертикальным или горизонтальным сечениям исследованного объема стекломассы, позволяет несколько уточнить вышеприведенные выводы, поскольку графическое изображение резче подчеркивает закон распределения температур в изученном бассейне.

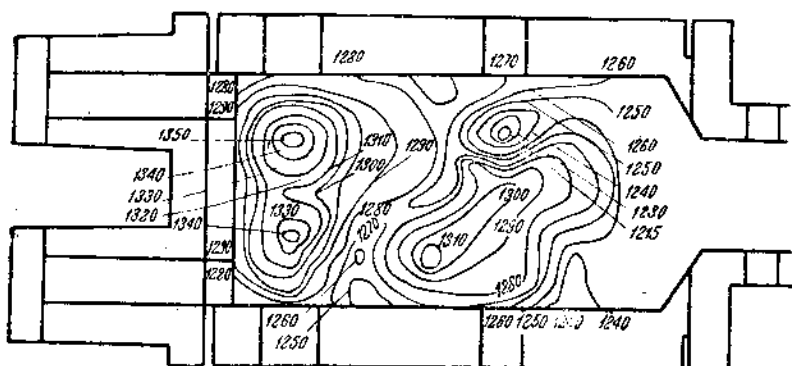


Рис. 12. Изотермы по горизонту I.

1) Изотермы в горизонтальных плоскостях— по 4 горизонтам (рис. 12, 13, 14, 15).

Наиболее густая сеть получилась на 1-м и 3-м горизонтах, менее плотная — на 2-м и 4-м. Это подтверждает наличие горизонтальных потоков на указанных горизонтах (поперечные потоки к продольным стенкам и обратно) и иллюстрирует меньшую подвижность промежуточного и глубинного (придонного) слоя.

Закономерной симметрии в расположении изотерм не замечается; лишь в 1-м горизонте в зоне, ближайшей к горелкам, заметны 2 симметричных максимума; глубже эти оба максимума сливаются в один, расположенный у продольной центральной оси ванны.

2) Изотермы в продольном направлении— в вертикальной плоскости (рис. 16, 17, 18).

Во всех 3 продольных разрезах наблюдается примерно одна и та же картина. По мере приближения к выработочной части изотермы все повышаются, причем у дна имеется 2 температурных максимума— около горелок (1-я поперечная скорость) и на расстоянии 2—2,5 м от сыпучей стенки. Повидимому здесь имеет место пересечение указанных выше горячих диагональных потоков стекломассы.

3) Изотермы в поперечном направлении— в вертикальных плоскостях (рис. 19, 20, 21, 22 и 23).

В общем здесь изотермы идут по направлениям, близким к горизонтальному; встречающиеся отклонения (2-е, 4-е и 5-е поперечные сечения) демонстрируют температурную асимметрию.

Различная густота в расположении изотерм на верхних и нижних горизонтах легко объясняется постепенным угасанием лучепрозрачности стекломассы по мере увеличения ее толщины, за счет чего меняются и температурные градиенты; тому же способствует и возросшая пассивность ее в смысле подвижности за счет увеличения вязкости. Особых данных к расшифровке поперечных потоков эта схема изотерм не даст.

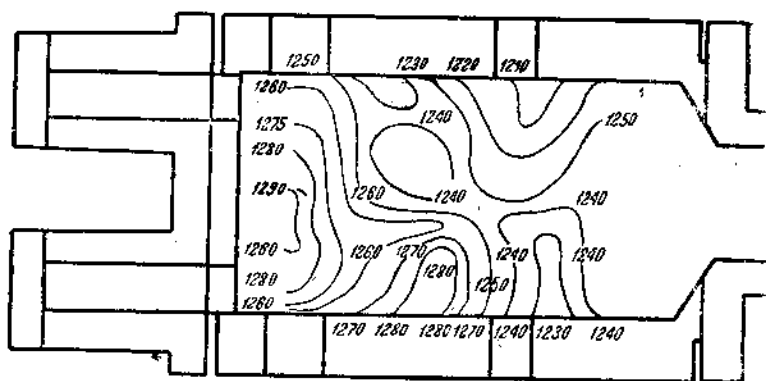


Рис. 13. Изотермы по горизонту II.

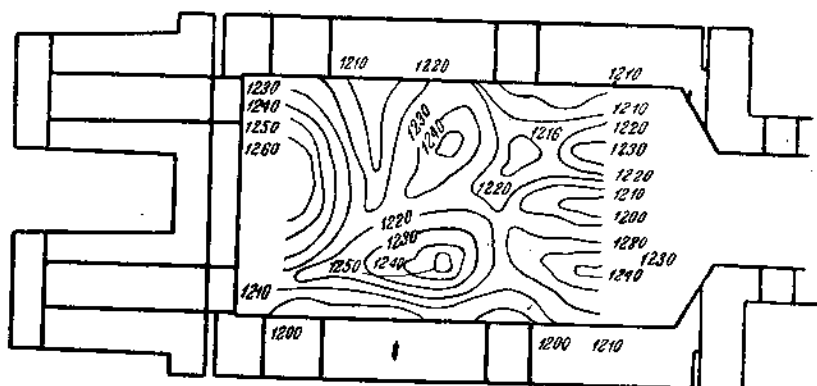


Рис. 14. Изотермы по горизонту III.

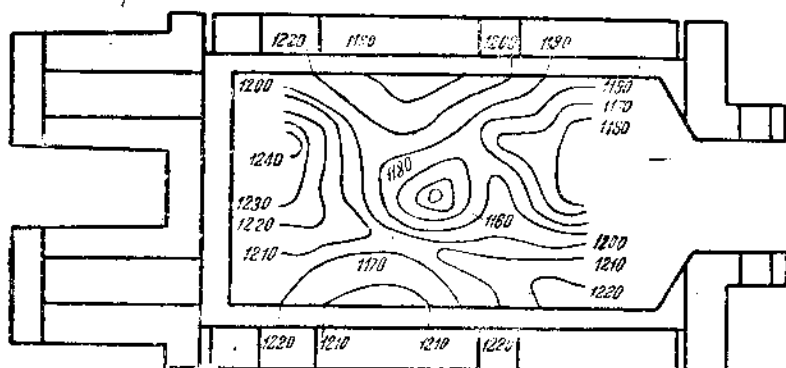


Рис. 15. Изотермы по горизонту IV.



Рис. 16. Изотермы в стекломассе (центральная продольная линия).

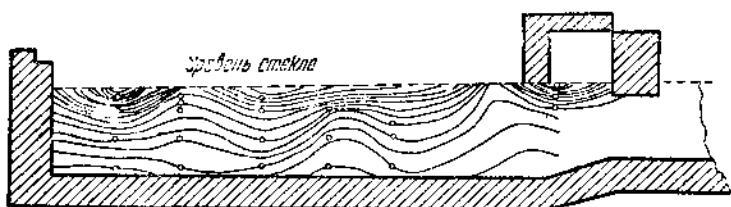


Рис. 17. Изотермы в стекломассе (правая продольная линия).

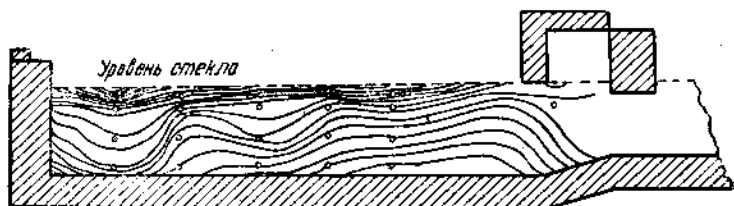


Рис. 18. Изотермы в стекломассе (левая продольная линия).

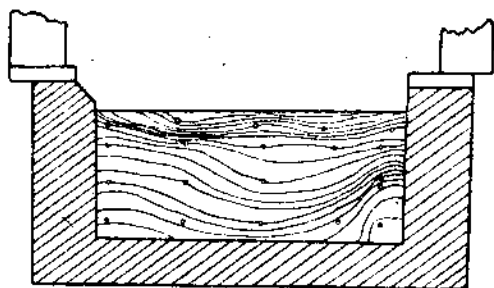


Рис. 19. Изотермы в стекломассе (поперечной линии I).

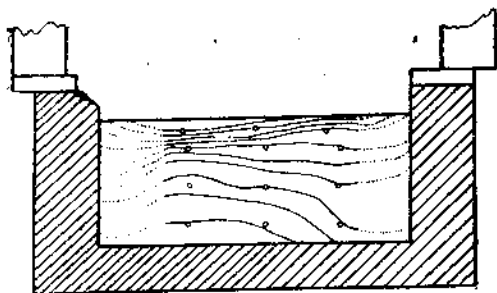


Рис. 20. Изотермы в стекломассе (поперечной линии II).

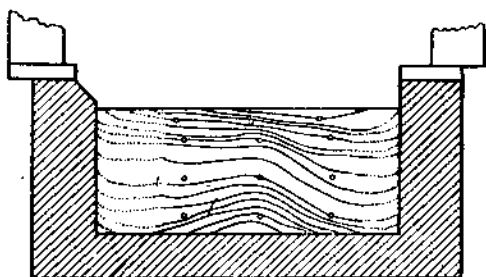


Рис. 21. Изотермы в стекломассе (поперечной линии III).

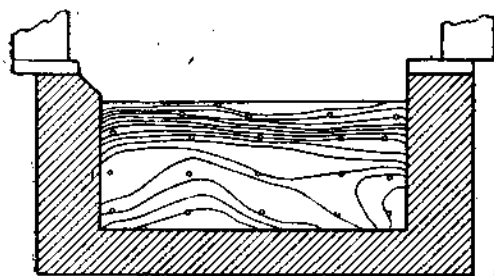


Рис. 22. Изотермы в стекломассе (поперечной линии IV).

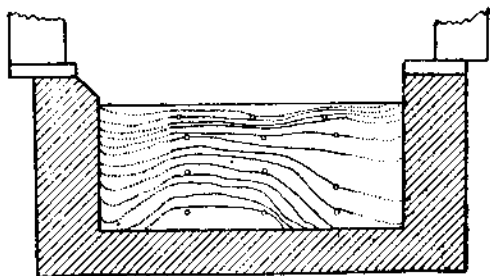


Рис. 23. Изотермы в стекломассе (поперечной линии V).

Проф. М. Г. Степаненко

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛЕРА «СИМПЛЕКС»¹

(Сергиевский механизированный стеклозавод)

1. Цель и задачи исследования

Процесс отжига стеклянных изделий, полученных ручным или механизированным способом, является весьма существенной операцией в общем цикле производства, так как определяет механическую и термическую стойкость готового товара. Поэтому следует считать совершенно необходимым полное овладение этим процессом, так чтобы можно было по мере надобности, вытекающей из разного характера отжигаемых изделий (состав стекла, толщина стенок изделий), соответствующим образом и в надлежащей степени изменить существующий режим отжига или же налаживать его заново. Однако в настоящий момент большинство работающих в СССР отжигательных печей как периодических, так и непрерывно действующих, известных под разными названиями: «закальный опечек», «откальный рукав», тягун, отжигательная печь и др., — вряд ли может претендовать на какую-либо объективную изученность: процессы отжига в них протекают при весьма слабом контроле, часто без аппаратуры, опираясь в основном на субъективный опыт обслуживающего персонала. В области чисто механизированного производства, завоевывающего в данный момент у нас все более и более обширный ассортимент изделий, наибольшее распространение имеют для оконного стекла, вытягиваемого по способу Фурко, шахты Фурко, а для бутылок, полученных на машинах Линча, — отжигательные печи — леры системы «Симплекс».

Эти последние установки являются механизированными и как таковые снабжены контрольно-измерительной аппаратурой. Однако, несмотря на это, судя по результатам работы их, нельзя признать вполне удовлетворительным существующий в них тепловой режим, а поэтому целесообразно, учитывая наличие в Союзе 22 леров этой системы, исследовать фактический режим последних, найти и изучить методы регулировки их.

¹ Работа проведена сотрудниками теплотехнической лаборатории ГЭСИ инж. Н. С. Соколовым, Т. И. Симоновой, А. К. Руппуль, М. В. Волтуновым

Таким образом первым этапом исследования является фотография существующего режима. Однако это далеко не достаточно, так как в зависимости от типа и сорта изделий режим отжига, «температурная кривая отжига» должны быть каждый раз разными. Поэтому следующим этапом должен послужить анализ теплотехнического режима лера и определение влияния отдельных факторов его на продольное (и поперечное) распределение температуры в печном пространстве. Тогда на основании указанных данных станет возможным построение и отрегулировка режима лера таким образом, чтобы он (режим) отвечал требованиям, предъявляемым технологами в отношении отжига стеклянного полуфабриката различных типов и форм.

Вместе с этим выяснение роли отдельных факторов, определяющих процесс горения, позволило бы в дальнейшем подойти и к последнему этапу — рационализации, усовершенствованию существующей конструкции, определяемой улучшением основных показателей в работе установки, понижению расхода топлива, уменьшению процента брака по отжигу, а также уменьшению капиталовложения (удешевление постройки, замена дорогих материалов более дешевыми и т. п.).

Проводимое исследование, будучи по своему масштабу достаточно скромным, не может, естественно, претендовать на полный охват всех указанных задач, тем более, что встретившиеся на заводе условия работы не позволили целиком осуществить намеченную программу, опирающуюся на существующую в теплотехнической лаборатории ГЭИС контрольно-измерительную аппаратуру.

Кроме того использование метода сквозного пирометража — единственно безупречного при данном режиме работы — сможет определить пригодность применяемой специальной аппаратуры, сконструированной проф. В. Э. Бромлеем, который затем можно будет придать значительно более широкое промышленное применение.

III. Программа и методы изучения

Основной частью работы являлся пирометраж лера, т. е. детальное изучение температурного режима его, распределения и изменения температур в пространстве как муфельной коробки, так и топочных камер. С целью установления теплового баланса лера температурному исследованию подверглись входящие газы (генераторный газ и воздух), отходящие (дымовые газы), а также отжигаемый полуфабрикат и лента конвейера.

A. Температурное исследование

Температурное изучение проводилось двумя способами — обычным, стационарным, при помощи неподвижно установленной аппаратуры, показания которой фиксировались через короткие промежутки времени, и далее — подвижным, сквозным пирометражем, пользуясь аппаратом, специально изготовленным проф. В. Э. Бром-

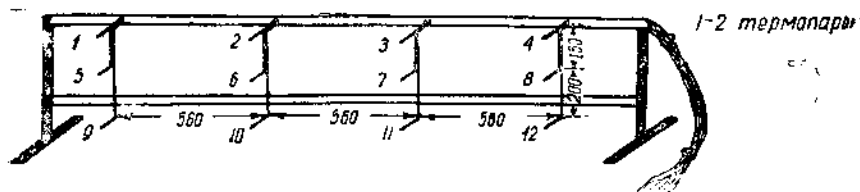


Рис. 1. Схема сквозного пирометра проф. В. Э. Бромлей

лей (рис. 1). Этот аппарат укреплялся на пластинках непрерывно движущегося конвейера лера и вместе с ним проходил через весь лер, фиксируя температуру пространства внутри муфеля показаниями системы термопар, установленных на аппарате.

Б. Термометрическая аппаратура

В соответствии с этим приборы для измерения температур состояли из ртутных термометров для наружного обмера, железо-константановых термопар (для температур ниже 300°), смонтированных на аппарате Бромлей, а также находящихся в контрольных точках лера, и платино-платинородиевых термопар, контролировавших тепловой режим топочных камер.

Места установки стационарной аппаратуры выбирались так, чтобы связать основные узловые точки и дать возможность построения непрерывного пространственного графика температур. При этом учитывали различные факторы (засос воздуха, интенсивная теплоотдача), влияющие на установление местных температур с тем, чтобы можно было достаточно точно сопоставить отдельные стороны общего теплового режима (состав газа, скоростной режим, величины тяги или давления и т. п.).

Кроме того, учитывая довольно сложную систему ходов и путей, обогревающих муфель газов, следовало изучить роль и влияние отдельных каналов на распределение температур внутри муфеля. Однако в полной мере это не удалось, так как завод, эксплуатируя лер, не соглашался на перфорирование стенок и отдельных перегородок, что могло бы временно отразиться на режиме отжига неблагоприятным образом.

Всего было установлено:

Платино-платинородиевых термопар 2 шт. в первой пламенной коробке (топочной камере), симметрично относительно средней продольной оси лера (термопары № 1, 2).

Железо-константановых термопар — 10 шт. (стационарных). Первая и четвертая термопары помещались на расстоянии 1,75 м от начала лера, по обеим сторонам его, вторая и пятая — на 2,75 м, третья и шестая — на 4,25 м, седьмая — на 6,7 м, восьмая и девятая — во второй топочной камере (справа и слева); девятая — у цоколя трубы топочной камеры.

Часть контрольных точек обслуживалась периодически устанавливаемыми приборами. Таковыми точками являлись пластинки

конвейера лера, где температуры измерялись 3 раза в смену, выходящие из машины бутылки (обслуживались особо смонтированной голый железо-константановой термопарой) и наконец хвостовая часть лера, где температура измерялась через люки в сво-
диках.

Места установки показаны на чертежах лера и на схеме прибора (рис. 2, 3 и 4). Аппарат для сквозного пирометража приведен на рис. 4 и представляет собой станок, снабженный 12 или 18 железо-константановыми термопарами, расположенными в 3 горизонтах по 4 или по 6 шт. в каждом. Прибор при помощи шурупа закреплялся на ленте конвейера, который при этом останавливали, и далее двигался вместе с лентой внутри муфеля; 12 (или 18) термопар распределялось в сечении муфеля так, что нижний горизонт (4 или 6 шт.) отстоял от ленты на расстоянии 1,5—2 см, средний горизонт (4 или 6 шт.) — на 20—22 см и третий горизонт (тоже 4 или 6 шт.) — на высоте 35—37 см. Горизонты выбраны соответственно очертанию отжигаемых изделий (бутылок) — дно — сужение корпуса — горлышко. Поперек лера термопары располагались на 15 см от боковых стен муфеля, а между собой — на 55 или 34 см. Длина термопар — 25 м. Все термопары имеют изоляцию из фарфоровых бус, причем все 12 (или 18) термопар соединены в общий кабель, постепенно вводимый с правой стороны муфеля.

В. Скорость движения изделий

Контроль скорости движения ленты (конвейера), определяющей фактический режим отжига изделий во времени, осуществлялся каждый раз, как только приступали к пропуску аппарата В. Э. Бромлей через лер, причем за все время сквозного пирометража скорость ленты подвергалась проверке 3 раза в смену.

Г. Анализ процессов горения

Анализ процессов горения, который должен был охарактеризовать степень совершенства сжигания горючего в лере, а также дать указания на гидродинамику газов, обращающихся в лере, и на плотность конструкции его (засос), осуществлялся систематически проводимым газовым анализом при помощи прибора Орса. Сопоставление состава продуктов горения с составом генераторного газа, отапливающего лер, позволяло в дальнейшем обосновать тепловой баланс всей установки в целом и подойти к определению удельного расхода топлива.

Д. Гидродинамический режим газовой среды

Изучение гидродинамического режима печных газов, образующихся в передней топочной (огневой) камере лера и движущихся в сложной системе ходов, окружающих карбофраксовый муфель лера, является интересным и необходимым дополнением к харак-

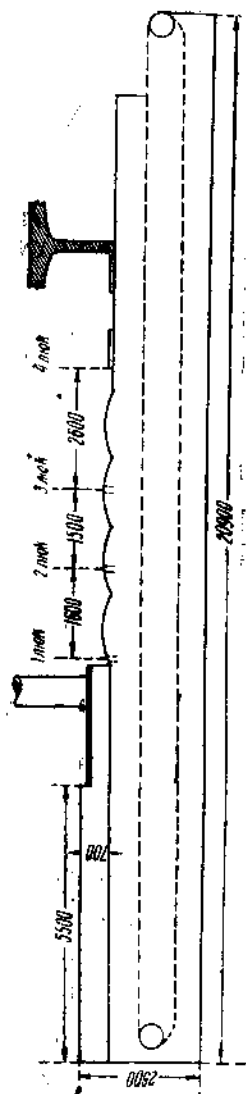


Рис. 2. Вид лера „Симплекс“ сбоку.

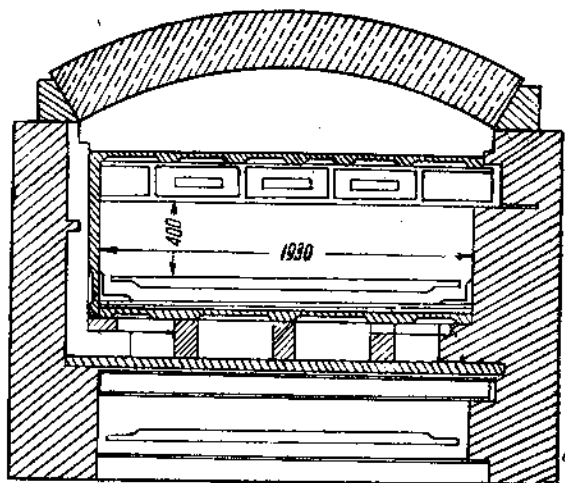


Рис. 3. Поперечное сечение лера „Симплекс“.

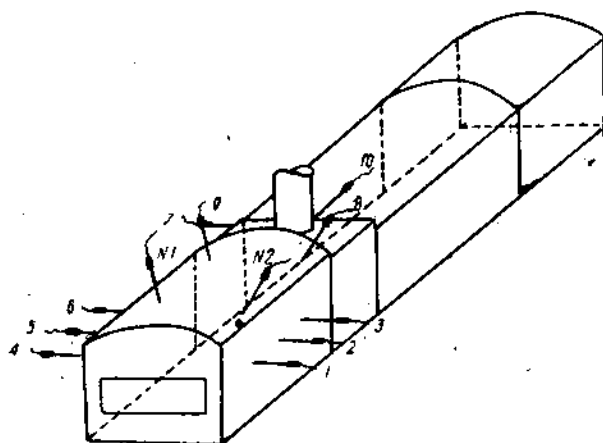


Рис. 4. Расстановка термодпар в лере „Симплекс“

теристике теплотехнических процессов, протекающих в нем. Результаты по исследованию разрежения печных газов позволят установить наиболее экономный режим в смысле расхода топлива (тяговая сила трубы), а скоростные данные пригодятся при обсуждении целесообразности конструкции каналов (сечения их) и дадут ряд дополнительных соображений по теплопередаче. Тяга измерялась в 7 точках: в боковых демперных каналах, в 2 точках по вертикали с обеих сторон лера, перед правым и левым шиберами и в дымовой трубе — при помощи тягомера Креля.

III. Результаты исследования

А. Объект изучения

Объектом изучения являлся один из 4 леров, обслуживающих 5 машин Линча, поставленных у ванны системы «Симплекс» на Сергиевском механизированном стекольном заводе.

По согласованию с заводом был выбран лер № 4, как отдельно стоящий и наиболее удобный в смысле доступности для установки аппаратуры и наблюдения за ней. Во время исследования лер загружался стандартной бутылкой весом 0,55—0,57 кг.

Отапливался лер генераторным (дровяным) газом, учет которого являлся особой частью всего исследования, позволявшей сделать попытку составить тепловой баланс всей установки.

Однако необходимо оговорить, что состояние указанного лера нельзя назвать хорошим: несколько карбофраксовых плит муфеля было заменено шамотными, часть их была повреждена (трещины), швы в кладке в нескольких местах разошлись, так что в топочные камеры заметно засасывался воздух (см. дальше). Газовые каналы были сильно засорены сажей и коксом, вследствие чего движение газов было на обеих симметричных сторонах лера неравномерным. Попытки очистить каналы от сажи и кокса не увенчались успехом, так как кладка лера плохо держалась. Поэтому было невозможно регулировать движение газов демперными заслонками в вертикальных каналах, оперируя исключительно дымовыми шиберами. Причину появления коксовых настывей следует отнести повидимому за счет неполного горения нефти, впрыскиваемой в пламенную коробку лера весьма примитивным образом тогда, когда газа нехватало.

Б. Метод установки «сквозного пирометра»

Вставка пирометрического прибора в лер производилась следующим образом. Движение ленты лера прекращалось, как только снизу (к переду) подходила планка конвейера, имеющая специальные установочные отверстия. Открывая заслонку у муфеля, очищали место для прибора, который затем закрепляли на конвейере, устанавливая термопары на определенный горизонт. Подачу товара прекращали за 10 мин. до остановки ленты. Далее заслонка закрывалась и, не пуская конвейер, наблюдали, пока термопары не будут показывать постоянную температуру; это значило, что самый аппарат весь нагрелся. Затем пускали в ход пушер и ленту, так что следующие за приборами изделия, поступающие на отжиг, становились от него на расстоянии 20—25 см. При таком методе закономерное изменение температур обнаруживалось на расстоянии 1,0—1,2 м от начала (заслонки) лера.

В. Режим наблюдений

Режим наблюдений был принят следующий. Прежде всего решено было изучить заводский режим лера, ничего не меняя в нем, ведя установленный заводом метод отопления с соблюдением соответствующей нагрузки отжигательными изделиями, контро-

лируя детально их качество по выходе из лера. Затем, на основе анализа данных, следовало внести вытекающие, как выводы из наблюдений, коррективы в режим отопления, установить этот режим, в чем убедиться контрольным пропуском прибора через лер с одновременным контролем качества выходящей продукции. И наконец необходима была вторичная контрольная поверка вновь установленного режима, принимая меры к снижению удельного расхода топлива.

Все температурные наблюдения как по движущемуся прибору с 12 (или 18) термомпарами, так и по стационарно установленным производились через каждые 3 мин. Гидравлическая характеристика (разрежение и давление) отмечалась каждые 3 мин.; состав дымовых газов определялся 4—6 раз за время прохода прибора (4 часа). Скорость выхода дыма (в трубе) определялась каждые полчаса. Анализ генераторного газа производился 2 раза во время каждого опыта. Температурный режим по второй огневой камере характеризовался показателями двух железо-константановых термомпар № 8 и 9; кроме того тут же следует привести и показания третьей термомпары № 10, вставленной в цоколь дымовой трубы.

Результаты 5 опытов при заводском режиме и 2 — при режиме ГЭИС обнаружили, что левая сторона камеры более нагрета; объяснение этому дано ниже. Заводский режим, обуславливая показания для левой термомпары № 9, колеблющиеся между 520 и 705°, определял среднюю температуру, равную 610°, соответственно этому справа (№ 8), получались температуры в пределах 545—565°, в среднем — 560°, т. е. на 50° ниже левой.

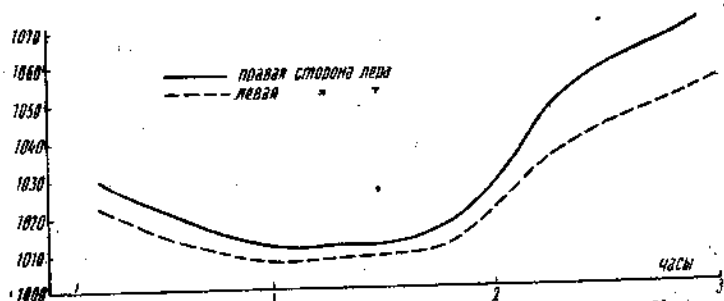
Режим ГЭИС почти не изменил показания этих термомпар, слегка сгладив разницу; при этом получились — для термомпары № 9 (слева) в среднем 610° (550—700°) и для термомпары № 8 (справа) в среднем 585° (560—705°).

Таким образом разница уменьшилась до 35°. Фактические изменения указанных выше температур по термомпарам № 8 и 9 при обоих режимах приведены на графике № 3 (см. ниже).

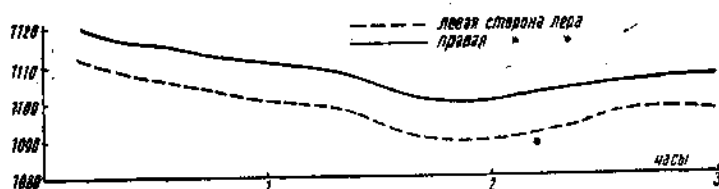
Температура отходящих топочных газов по заводскому режиму колеблется в пределах 430—505°, давая среднюю — 470°; следовательно амплитуда $\pm 35^\circ$; что вполне допустимо. Режим, предложенный ГЭИС, характеризующийся перемещением фокуса горения по направлению к выходу, обусловил более высокую температуру дыма — 500° в среднем с колебанием также $\pm 35^\circ$. Несмотря на увеличение потери тепла с дымом за счет повышения температуры последнего, нельзя говорить о нецелесообразности указанного изменения. Сравнение качества продукции до и после изменения явится решающим критерием правильности данного мероприятия.

Г. Распределение температуры в лере

Сведя всю сумму наблюдений в отдельные графики, относящиеся к пропускам аппарата В. Э. Бромлей при различных режимах, можно охарактеризовать распределение температур в разных частях установки следующим образом:



Граф. 1. Температура передней топочной камеры (заводский режим).



Граф. 2. Температура передней топочной камеры (режим ГЭИС).

1. Температурный режим в топочных (огневых) камерах лера.

Согласно вышеуказанному, температура в двух огневых камерах лера контролировалась при помощи термопар-платино, платино-родиевых и железо-константановых. Непосредственный режим горения фиксировался двумя платино-платинородиевыми термопарами, вставленными симметрично продольной оси лера в свод первой огневой камеры.

Заводский режим, как правило, характеризовался температурами пламенного пространства между 1010 и 1070°; причем обе термопары давали аналогичные во времени показания; разница между ними доходила максимум до 30°. Как потом оказалось, эту разницу следует приписать разной степени регулировки двумя дымовыми шиберами.

Средние значения температур платинородиевых термопар за 5 испытаний (пропусков аппарата через лер) представлены на графике 1.

Режим Ин-та стекла, заключавшийся в стремлении повысить нагрев ленты, т. е. дна муфеля, не мог не отразиться на показаниях указанных термопар в сторону повышения: благодаря переносу факела горения и интенсификации его температура первой огневой камеры значительно поднялась, колебалась между 1080 и 1120°. Однако симметрия показаний обеих термопар от этого, как правило, не нарушилась; следует при этом указать, что в одном контрольном пропуске эта разница достигла 50°, опять-таки за счет неравномерной регулировки шиберами. Влияние повышения температуры в пламенной зоне — общее распределение

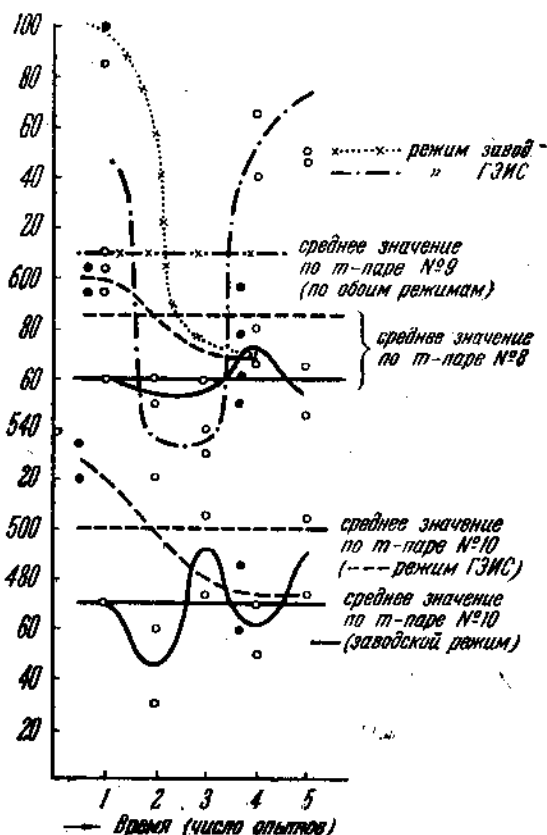
температур в муфеле и в отдельных его каналах — будет указано ниже. На графике 2 показаны средние из трех опытов значения температур платинородиевых термопар при режиме ГЭИС. На графике 3 — температура второй камеры и в цоколе трубы (по обоим режимам).

2. Температурный режим в муфеле лера

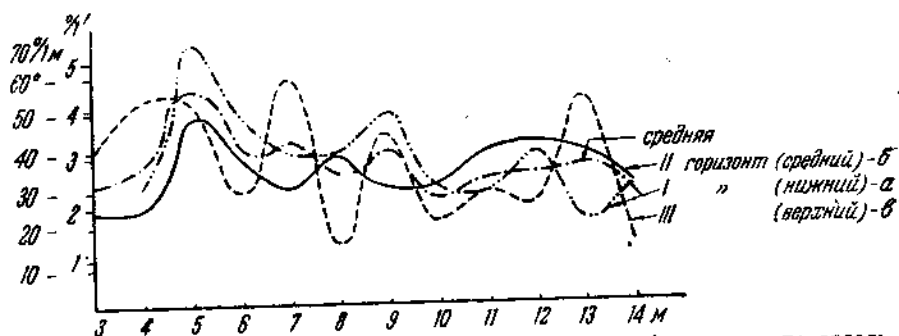
Характеристика указанного режима является наиболее интересной, так как правильное установление надлежащей температурной кривой определяет производственную работу всей установки и обуславливает соответствующее качество выпускаемых изделий.

Так как муфель лера представляет собой значительно вытянутый в длину канал, то нельзя было ограничиться изучением

распределения температуры вдоль какой-либо одной линии (горизонтальной), имея в виду, что при ширине ленты в 1,93 м и высоте муфеля 0,39 м несомненно может получиться разный температурный режим. Таким образом следовало изучить совокупность горизонталей, проведенных на различной высоте и в различных вертикальных плоскостях движению ленты. Этому методу исследования вполне удовлетворял аппарат Бромлея, снабженный 12 или 18 термопарами по 14 или 6 штук на одном горизонте. Такое расположение при частой и одновременной фиксации температур позволяло обнаружить неравномерность в поперечном или вертикальном направлениях и выяснить причины их, ибо, принимая во внимание однородный товар, необходимо было иметь и одинаковый режим на одних и тех же горизонтах всего поперечного сечения. По отношению к вертикальному распределению подходить можно иначе, так как различные части изделия (например у бутылки — донышко, корпус, горлышко) могут требовать разные режимы отжига, то здесь



Граф. 3. Температура второй топочной камеры и в цоколе трубы (по обоим режимам).



Граф. 4. Изменение падения температур по длине лера (средняя и по отдельным горизонтам) (заводский режим).

возможна соответствующая регулировка температур, что представляется в обычном случае делом более легким, чем поддержание одинаковой температуры. Учитывая принятый метод исследования, представляется необходимым представить анализ распределения температур по трем пропускам: при заводском режиме, при заново установленном и поверочный пропуск по новому режиму.

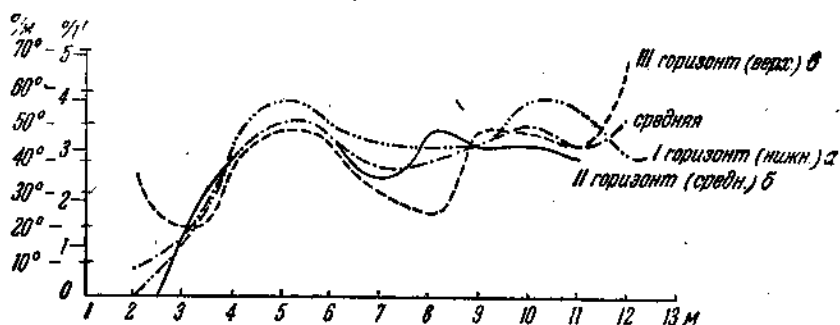
а) Распределение температур в лере при заводском режиме.

Наиболее существенным является распределение температур вдоль длины лера. Но так как методика позволила сразу получить 12 или 18 продольных линий (температур), то целесообразно рассмотреть изменение по отдельным горизонтам, а затем по отдельным вертикалям.

I горизонт — у поверхности ленты конвейера. Максимальная температура в 500° устанавливается между 2-м и 3-м м длины лера на 27-й минуте. Далее по движению конвейера температура падает, но неравномерно, что видно из графика 4-а, представляющего изыскание удельной величины падения температуры по длине лера (или времени). Общая тенденция — уменьшение удельного падения, но резко заметны 2 максимума: на 5-м и 9-м м — $5,4^{\circ}/\text{м}$ и $3,9^{\circ}/\text{м}$. Затухающий характер остывания (уменьшение падения за единицу времени) легко объясняется уменьшением теплоотдачи вследствие снижения температурных разниц между теплообменивающимися массами и меньшей теплопроводностью кладки за мuffleйной частью лера.

II горизонт — максимальная температура также между 2-м и 3-м м, однако значение ее ниже, чем у I горизонта, что объясняется подогревом термонар за счет лучистой теплоты планок конвейера, легче нагревающихся в головной части лера. Наибольшая температура 460° . Снижение ее (темпы падения) видно на графике 4 — б. Она наиболее равномерна и имеет всего 1 резкий максимум $3,9^{\circ}/\text{м}$. Колебания падений температуры заключены в пределах $1,9—3,9^{\circ}/\text{м}$.

Более спокойный ход указанной кривой обусловливается малой теплопроводностью газовой массы и частично перемещением этих газов по леру, что смягчает температурные перепады.



Граф. 5. Изменение падений температур по длине лера (средняя и по отдельным горизонтам) (режим ГЭИС).

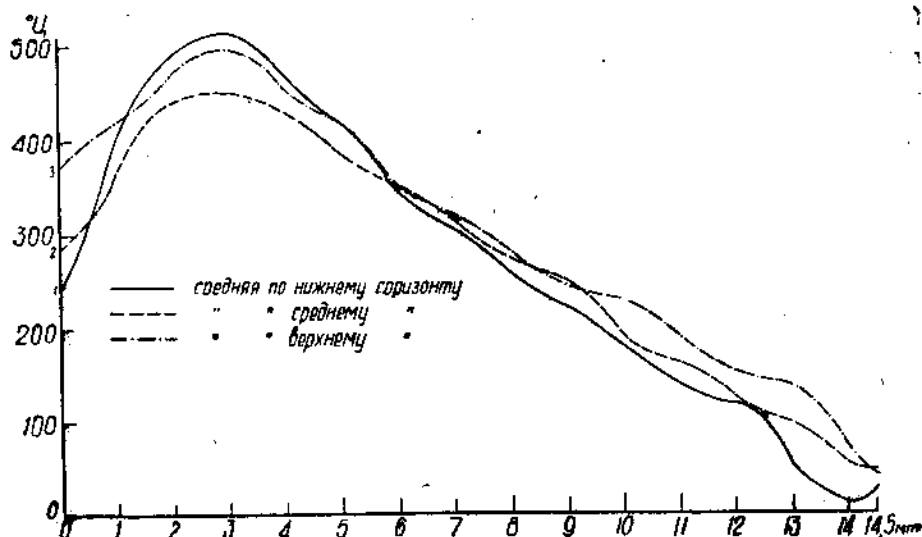
III горизонт — у свода. Максимум температуры между 2-м и 3-м м достигает 530° . Однако изменение температуры наиболее капризное, что находит себе объяснение в расчленении всего лера по длине на отапливаемую и неотапливаемую части. Нагреваясь лучеиспусканием нагретых карбофраксовых плит и балок в зоне огневой (I) камеры, термодары верхнего горизонта имеют и максимум температуры и более резкое падение, в особенности при переходе в неотапливаемую часть (далее 6 м). В дальнейшем кривая температур имеет волнистый характер, обусловливаемый перемежающимися сводками второй половины лера. Величина падения температур колеблется между $4,6^{\circ}/\text{м}$ и $1,2^{\circ}/\text{м}$; затухание падения здесь почти незаметно (см. график 4—в).

Сравнивая кривые температур по всей длине лера, на разных горизонтах и величины падения температур, следует заключить, что наименее закономерный режим обнаруживается наверху, в области отжига горлышка. Отставание температуры горизонта является наиболее опасным, но это обстоятельство можно выправить за счет перемещения фокуса горения (см. ниже). Во всяком случае данный режим характеризуется заметно выраженным температурным расслоением по отдельным горизонтам; каждый из последних имеет свой режим, совпадающий по длине лера лишь в нескольких точках (см. графики 6, 6а, 6б, 6в).

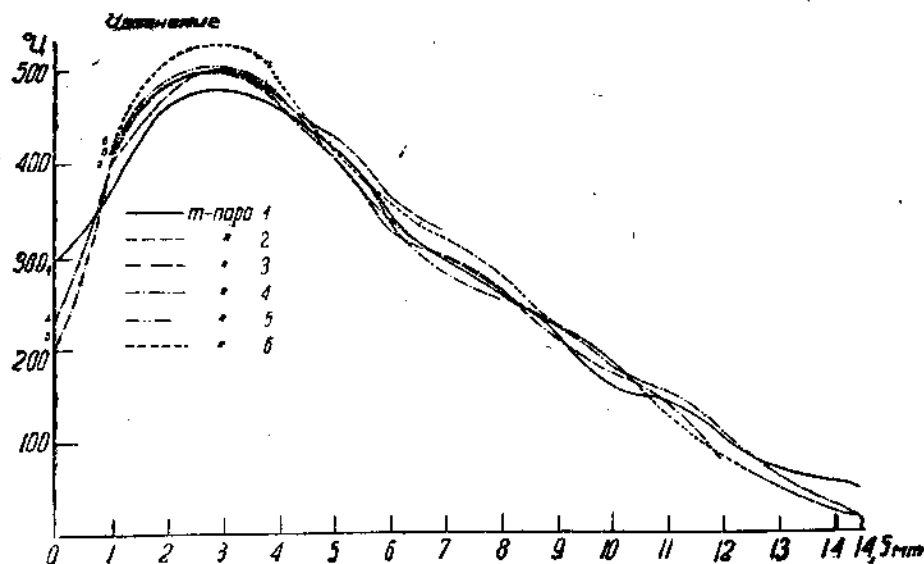
б) Распределение температур при новом режиме ГЭИС.

Как видно из графиков 7, 7а, 7б, 7в и 8 (см. ниже), отличие нового режима от старого в смысле продольного распределения температур заключается прежде всего в более высоком уровне начальных температур; заводский режим дает в качестве максимума показаний термодар 500° , новый режим 525° (средняя цифра по всем горизонтам); наибольшая температура по верхнему горизонту повышена с 540 до 570° , вместе с тем максимум температур сдвинут к началу лера (к головной части), приходясь на 2-й м вместо 3-го по заводскому режиму. Рассмотрение по отдельным горизонтам дает следующее:

I горизонт (нижний), максимум температуры устанавливается в 510° на 2-м м на 29-й минуте, падение температуры



Граф. 6. Изменение температуры вдоль лера по горизонтам (заводский режим).



Граф. 6а. Изменение температуры в пределах нижнего горизонта (заводский режим).

равномерно ускоренное на протяжении 3 м, далее темп падения замедляется до 9-го м, вновь резко ускоряется до 11-го м, приостанавливаясь к 12-му м — к 40°. Удельные величины падения 0 (1-й м) и 60° на м, или 4,1° в 1 мин. (кривая падения на графике 5 имеет 2 максимума, на 5-м и 10-м м) и принципиально

II горизонт (средний), максимальная температура — между 1-м и 2-м м. Падение температур носит также затухающий характер: наибольшее падение 50° на 1 м на 5-м и 8-м м; начинается падение с 3-го м. По абсолютному значению здесь температуры сравнительно ниже (I и III горизонты), что уже пояснено выше, и примерно равны температурам заводского режима.

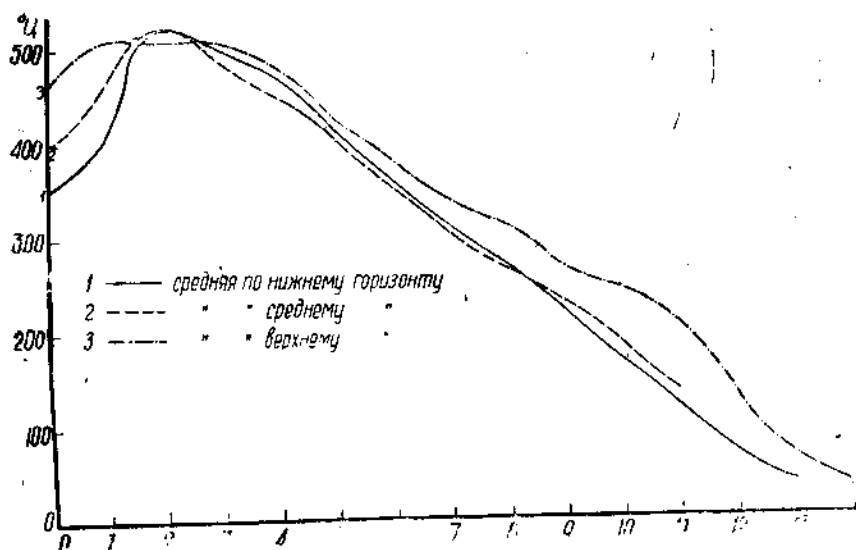
III горизонт (верхний) отличается повышенными температурами, изменение которых весьма неравномерно. Максимум температуры, как уже указано, 570° , а величины падения колеблются между 20 и 70° на 1 м ($1,1\text{--}4,8^\circ/\text{1 мин.}$). Во второй половине лера заметны в кривой температуры те же волнистые участки, что и при заводском режиме, но выражены они с меньшей амплитудой (ср. графики 6в и 7в).

Таким образом изменение режима отопления лера (учитывая и небольшое снижение скорости ленты с $7,78$ м/мин. до $0,70$ м/мин.) сказалось на распределении температур по длине лера прежде всего увеличением начальных температур с приближением их к началу лера. Во-вторых, кривые падения температур по длине приобрели более равномерный и пологий характер и, в-третьих, участок наиболее ответственных для отжига температур — от 2-го до 7-го м — приобрел более компактный характер: кривые отдельных горизонтов идут здесь теснее, нежели при заводском режиме.

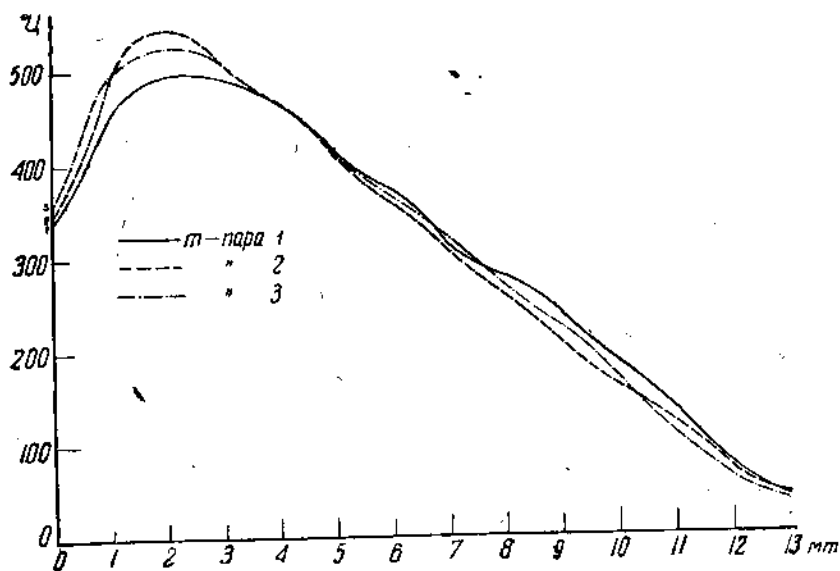
Контрольный пропуск, повторный пробег по отдельным горизонтам с увеличенным числом термопар (до 6 шт.), подтвердил указанное различие. Эффективность и влияние нового режима на качество фабриката будет показано дальше, так же как и данные по удельному расходу топлива.

Обращает на себя внимание участок кривой, характеризующий стабилизацию температур; при заводском режиме этот участок приходится на протяжении 3-го м от начала, между 13-й и 27-й минутой (III горизонт — $490\text{--}505^\circ$; II горизонт $445\text{--}450^\circ$; I горизонт $475\text{--}508^\circ$); при режиме ГЭИС этот участок перемещается к началу на 2-й м или по времени между 14-й и 29-й мин. (III горизонт $539\text{--}544^\circ$; II горизонт — $480\text{--}510^\circ$; I горизонт — $485\text{--}520^\circ$).

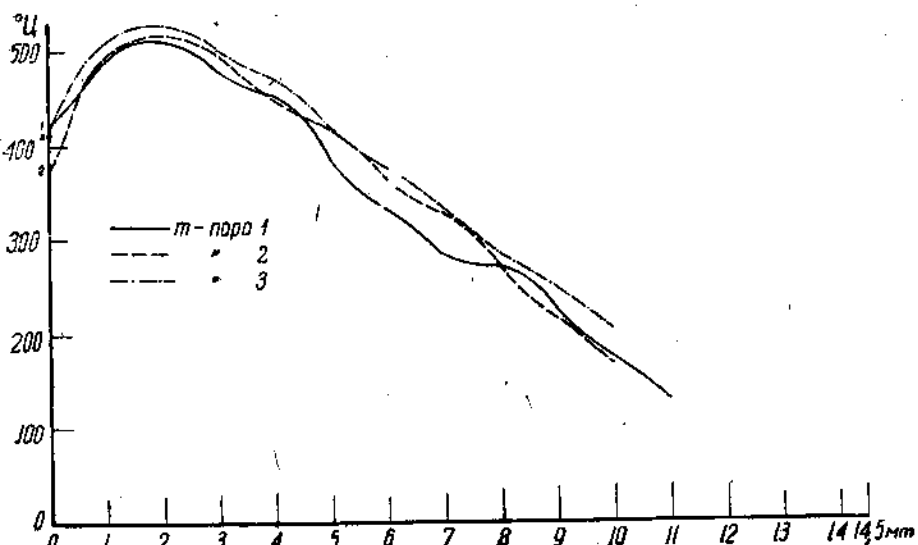
Запись температур по сквозному пирометру производилась до 13—14-го м, после которого температура газового пространства лера падала до 120° , как на это указывают контрольные измерения через люки. Время отжига при этом колебалось между $13,3 \times 13,5 = 180 = 3$ час. и $14,5 \times 13,5 = 196 = 3$ час. 16 мин. С точки зрения контроля правильности показаний термопар, поставленных на движущемся приборе, производились измерения температур в лере через люки в сводах, расположенных на расстояниях от начала лера: 8 м — 9,6 м, 11,1 м и 13,7 м. С этой целью, в лер вертикально опускались чувствительные термопары с малой инерцией — в первых трех люках по 3 термопары на разных высотах, а в 4-м люке — 2. Горячие слои их устанавливались на горизонтах 120, 350 и 100 мм от ленты, и таким образом можно было их



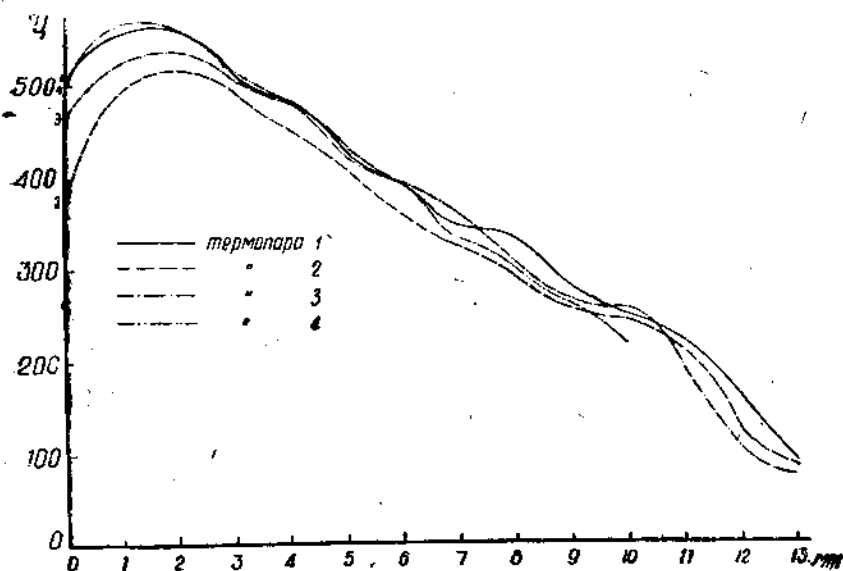
Граф. 7. Изменение температуры вдоль лера по горизонтам (режим ГЭИС).



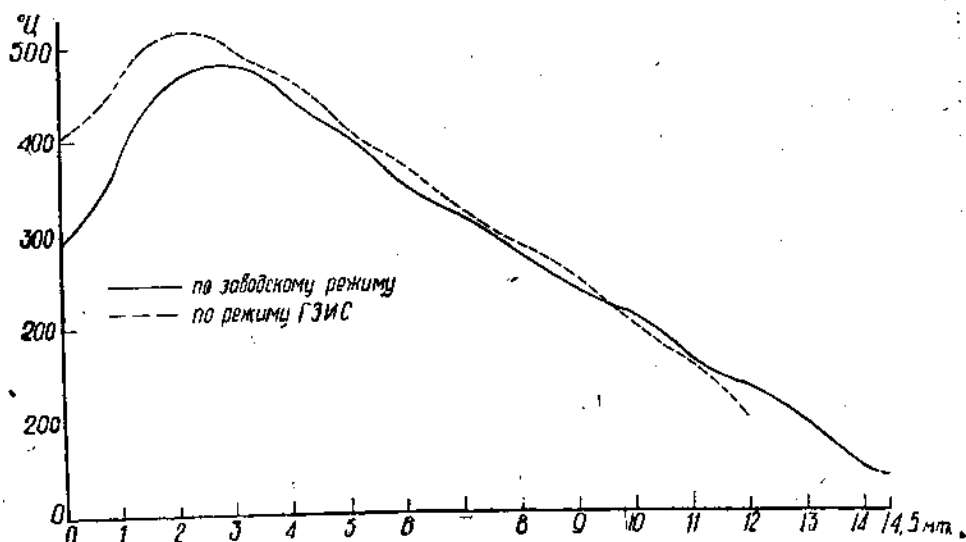
Граф. 7а. Изменение температуры вдоль лера в пределах нижнего горизонта (режим ГЭИС).



Граф. 76. Изменение температуры вдоль лера в пределах среднего горизонта (режим ГЭИС).



Граф. 7в. Изменение температуры вдоль лера в пределах верхнего горизонта (режим ГЭИС)]



Граф. 8. Средние температуры кривых отжига по обоим режимам.

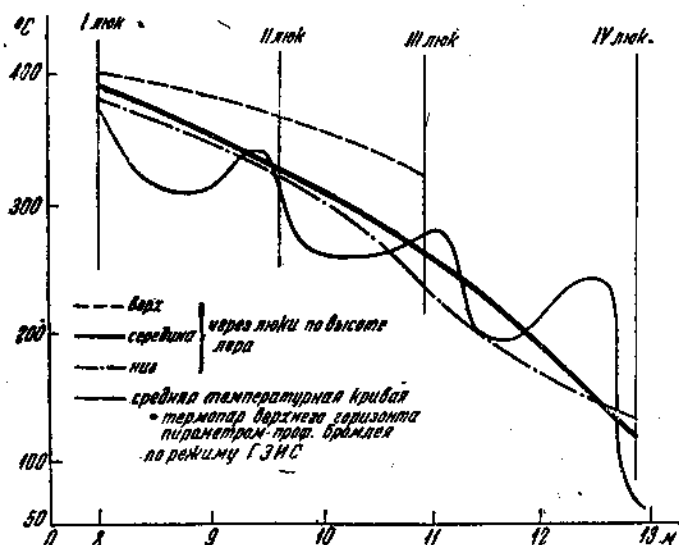
показания сравнить с показаниями «сквозных» термопар. Наблюдения велись каждый раз, как совершался пропуск прибора. На графике 9 изображена серия кривых (по двум опытам), причем значения температур являются средними за все время опыта (запись через 3 мин.).

Как видно, верхние температуры превышают значения по текущей температурной кривой, что объясняется их положением у нижней поверхности сводика; однако характер падения температур совершенно аналогичен.

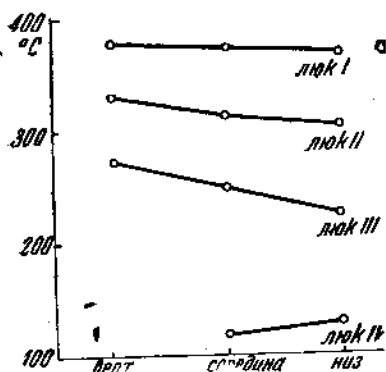
При указанном выше сопоставлении легко объяснить «холмистый» характер температурной кривой, наблюдающийся за 7-м м. Пики «холмов» почти совпадают с местами люков, устроенных в верхней части сводиков; получающийся здесь «мешок» горячих газов обуславливает подъем температуры; наоборот, под пятами сводиков наблюдается снижение («яма») температур за счет приближения сравнительно холодной кладки.

Однако необходимо отметить, что различные испытания (серии наблюдений) температуры в люках показали заметные колебания температур. В пределах 3-часового наблюдения колебание значений от средней величины не превышало $\pm 20^\circ$, но по отдельным опытам обнаружались и вдвое большие расхождения. Их следует объяснить появлением в лере случайных конвекционных потоков воздуха, охлаждавших аппаратуру.

Отставание показаний движущихся термопар следует отнести за счет частичного юбгирования материала термопар и связанного с этим повышения сопротивления их, имея в виду значительную длину термоэлементов (> 20 м).



Граф. 9. Изменение температур по люкам.



Граф. 9а. Падение температуры в люках (режим ГЭИС).

На графике 9а изображены падения температур по вертикали в каждом люке. Кривые показывают, что распределение температур по вертикали лера под люками почти равномерное в первых двух люках. 3-й люк обнаруживает уже падение на 50°, а 4-й — подъем температуры, что следует объяснить лучеиспусканием корпуса бутылок и затруднительностью конвективного обмена тепла под самой лентой, загруженной товаром.

Таблица 1

Температуры в лере, измеренные через люки

Опыты	Люк 1			Люк 2			Люк 3			Люк 4			Примечание
	Верх	Средина	Низ	Верх	Средина	Низ	Верх	Средина	Низ	Верх	Средина	Низ	
1-й . . .	360	365	368	314	300	295	265	242	220	—	115	—	Измерение через 3 мин. в продолжение 3 час.
2-й . . .	400	387	382	358	327	322	316	264	238	—	120	—	
3-й . . .	377	380	364	321	315	300	245	238	221	—	118	127	
В среднем	380	375	370	330	315	305	275	250	225	—	120	130	

В указанные выше цифры и графики входят значения и контрольного пропуса, дающего вполне удовлетворительные совпадения с принятым режимом ГЭИС.

Таблица 2

Изменение величины падения температуры по длине лера (заводский режим)

Горизонты Падение Длина	II-й горизонт нижний		II-й горизонт		III-й горизонт (верхний)		Среднее значение		Примечание
	°/м	°/1'	°/м	°/1'	°/м	°/1'	°/м	°/1'	
2-й м . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	Скорость ленты 1 м в 13 мин.
3 " " . . .	30	2,3	25	1,9	40	3,1	32	2,4	
4 " " . . .	30	2,3	25	1,9	55	4,2	38	2,8	
5 " " . . .	70	5,4	50	3,9	55	4,2	58	4,5	
6 " " . . .	50	3,9	40	3,1	30	2,3	40	2,8	
7 " " . . .	40	3,1	30	2,3	60	4,6	43	3,3	
8 " " . . .	40	3,1	40	3,1	15	1,2	32	2,5	
9 " " . . .	50	3,9	30	2,3	45	3,5	42	3,2	
10 " " . . .	30	2,3	80	2,3	20	1,6	27	2,1	
11 " " . . .	30	2,3	40	3,1	30	2,3	33	2,6	
12 " " . . .	40	3,1	40	3,1	25	2,0	35	2,7	
13 " " . . .	20	1,6	40	3,1	55	4,2	38	3,0	
14 " " . . .	30	2,3	30	2,3	15	1,2	25	1,9	

Таблица 3

Изменение величины падения температуры по длине лера (режим ГЭИС)

Горизонты Падение Длина	I-й горизонт		II-й горизонт		III-й горизонт (верхний)		Среднее значение		Примечание
	°/м	°/1'	°/м	°/1'	°/м	°/1'	°/м	°/1'	
2-й м . . .	0	0	10	0,7	35	2,4	8	0,5	Скорость ленты 1 м в 14,5 мин.
3 " " . . .	15	1,0	20	1,4	20	1,4	18	1,3	
4 " " . . .	45	3,1	40	2,8	40	2,8	42	2,9	
5 " " . . .	60	4,1	50	3,4	50	3,4	53	3,6	
6 " " . . .	50	3,4	45	3,1	45	3,1	47	3,2	
7 " " . . .	45	3,1	35	2,4	30	2,1	37	2,5	
8 " " . . .	45	3,1	50	3,4	25	1,7	40	2,7	
9 " " . . .	45	3,1	45	3,1	50	3,4	47	3,2	
10 " " . . .	60	4,1	45	3,1	50	3,4	52	3,5	
11 " " . . .	55	3,8	40	2,8	45	3,1	47	3,2	
12 " " . . .	40	2,8	—	—	70	4,8	55	3,8	
13 " " . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	
14 " " . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	

В целях взаимного контроля и возможности наиболее рациональной экстраполяции полученных данных по отношению к практическим результатам и связи с показаниями систематического контроля является интересным сопоставление температурных зна-

чений «движущихся» и «стационарных» термопар. Как уже указано, последних было 9, расставленных на обе стороны печи (5 — справа, 4 — слева; термопару в цоколе не считаем). Учитывая расстояния между ними, наносим их средние показания на общий температурный график по обоим режимам (график 6 и 7).

По своему положению — по высоте — стационарные термопары находятся несколько выше температур среднего горизонта (0,25 м против 0,22 м подвижных), а по глубине погружения (0,25 — 0,30 м) приходятся между двумя крайними термопарами (слева — между 1-й и 2-й, а справа — между 4-й и 3-й, или 6-й и 5-й).

ЗАВОДСКИЙ РЕЖИМ

Средние данные наблюдений из 5 серий

№ опыта	1	2	3	4	5	Средн.
Правая сторона:						
термопара № 2 . . .	535—544	526—552	520—540	536—544	525—535	520—550
„ № 3 . . .	500—520	480—520	485—500	500—520	470—500	470—550
„ № 8 . . .	560—560	550—560	550—560	565—580	545—565	545—565
Левая сторона						
термопара № 5 . . .	535—544	500—565	490—510	560—570	540—550	490—570
„ № 6 . . .	522—544	500—530	500—520	540—560	505—535	500—560
„ № 9 . . .	610—685	520—550	530—540	640—664	645—705	520—705

Средние значения: температура по термопаре № 2 — 536°

„ „ „ № 3 — 500°

„ „ „ № 5 — 536°

„ „ „ № 6 — 526°

температура по термопаре № 8 — 560°

„ „ „ № 9 — 610

Итак получается, что на расстоянии 2,75 м от начала лера (2-е отверстие) температура в нем держалась как справа, так и слева на одинаковом уровне — 536°.

Следующая симметричная пара (3 и 6) — уже несколько разошлась, определяя меньшую температуру справа 500° против 526° слева.

Термопары № 8 и 9 поставлены во второй топочной камере (огневой коробке), давая средние значения: для № 8 (справа) 560° и № 9 (слева) — 610° — и указывая тем самым на меньший нагрев правой стороны лера. Причины температурной асимметрии заключаются в нескольких обстоятельствах. Во-первых, в дефлекрах 1, 3 и 4 вместо разбитых карбофраксовых плит поставлены шамотные, менее теплопроводные (в 7—8 раз), во-вторых, дымовой

канал справа был засорен, благодаря чему разрежение (тяга) здесь оказалось меньшим, и в-третьих, эта сторона лера примыкала к наружной стене здания. Кроме того слева в лер поступают более горячие изделия, вследствие чего температурная асимметрия еще больше увеличивается.

Согласно температурному графику показание некоторых стационарных термопар оказывается значительно выше движущихся. Если по отношению к показаниям термопар второй и пятой следует фиксировать удовлетворительное совпадение их (показаний) с данными сквозных термопар (левая, верхний горизонт), то в отношении термопар третьей и шестой необходимо отметить значительное расхождение: в этом направлении можно предположить, что голые спай «сквозных» термопар легче «отдают тепло (лучеиспусканием) более холодным пластинкам конвейера лера менее нагретого, нежели стационарная термопара в массивном металлическом чехле (защита от потери лучеиспусканием).

РЕЖИМ И-та СТЕКЛА

Средние данные наблюдений (2 серии)

№ опыта	1	2	Средн.
Правая сторона: термопара № 2 . . .	555—590	500—545	500—590
„ „ „ № 3 . . .	556—560	480—495	480—605
„ „ „ № 8 . . .	595—605	560—575	560—605
Левая сторона: термопара № 5 . . .	590—605	520—550	520—605
„ „ „ № 6 . . .	590—600	490—510	490—600
„ „ „ № 9 . . .	700—700	550—595	550—700

Средневзвешенные значения:

по термопаре № 2	545°
„ „ № 3	520°
„ „ № 5	565°
„ „ № 6	545°
„ „ № 8	585°
„ „ № 9	610°

В этом случае, как и раньше, температурная асимметрия имеет место; термопары № 2 и 3—545 и 520°, а № 5 и 6—соответственно 565 и 545° С.

То же относится и к термопарам во второй огневой камере (№ 8 и 9); правая сторона на 25° холоднее левой (610—585 = 25° С). Сопоставляя показания сквозных термопар с температурным графиком, можно отметить то же расхождение, что и при заводском режиме. Однако, сравнивая значения показаний термопар № 2, 5, 3 и 6 с температурной кривой, данной фирмой «Симилекс», а также с результатами исследования аналогичного

лера на Константиновском бутылочном заводе, произведенными инж. Додоновым в 1929 г., следует признать показания «сквозных» термопар более отвечающими требованиям отжига; возможно, что здесь имел место перегрев стационарных термопар за счет металлической арматуры их, проходящей сквозь более прогретые стенки муфеля.

Распределение температур в поперечных направлениях также должно быть рассмотрено при двух режимах; заводском и ГЭИС.

Исходя из значительной ширины муфеля лера, равной 1,95 м, следует ожидать появления несомненной разницы температур в областях, близких к стенкам и внутренним. Вместе с тем в связи с изменением температуры по ходу ленты можно предполагать разницы в рисунке изотерм поперечного сечения, поскольку условия теплопередачи меняются вместе с температурой.

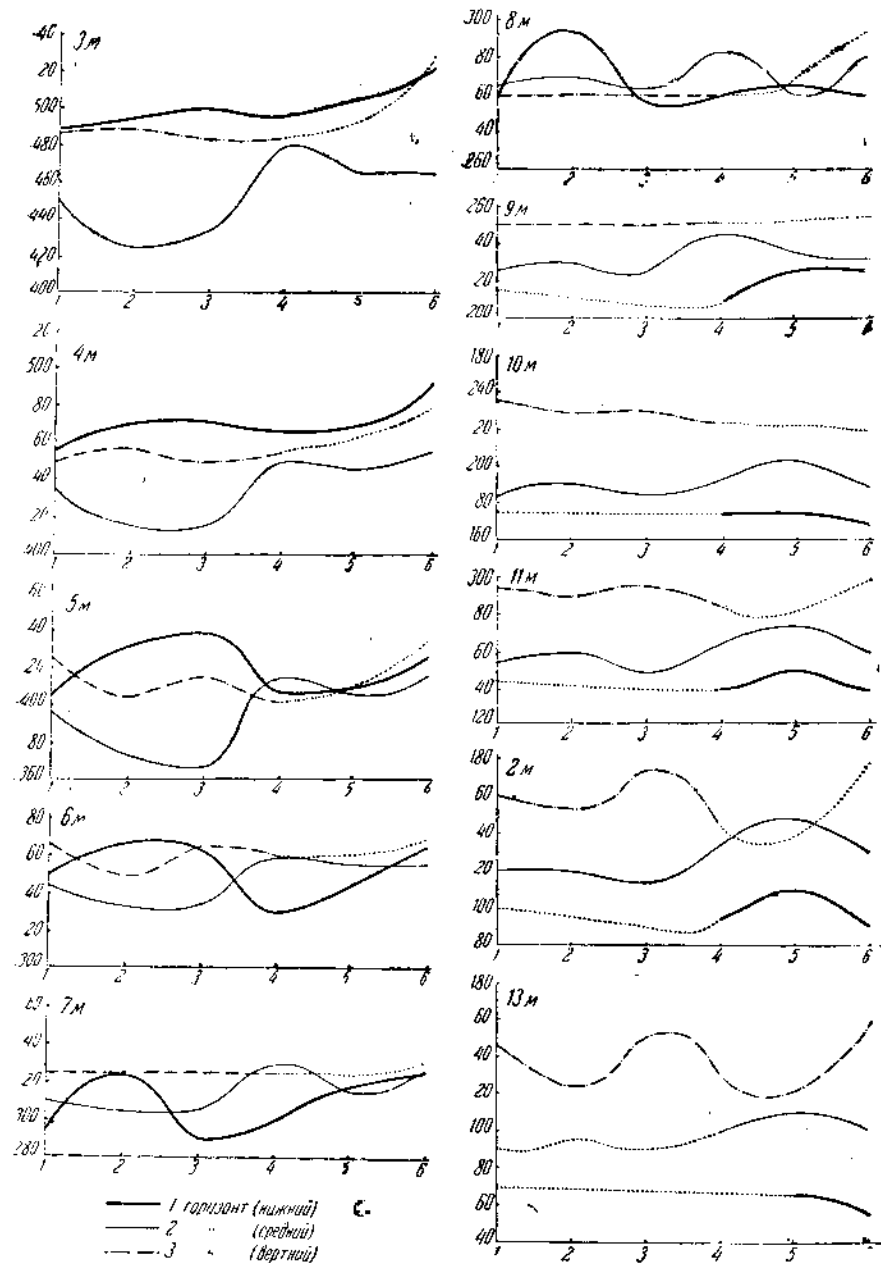
Заводский режим. Рассмотрение по отдельным горизонтам позволяет установить следующее.

Как показывает график 10, наиболее резкие колебания в показаниях «сквозных» термопар на нижнем горизонте обнаруживаются на 5-м, 6-м, 7-м и 8-м м, что повидимому объясняется более энергичной работой левых дымовых каналов; максимум температур у второй термопары слева, минимум — у двух средних. Крайние термопары (термопары первая — шестая) обнаруживают максимальное расхождение, достигающее 40° лишь на 2-м и 3-м м; в остальной области не больше 30°. Синусоидальный характер кривой повидимому объясняется неравномерной работой нижних дымовых каналов; 9-й, 10-й, 11-й, 12-й и 13-й м характеризуются значительно более выпрямленными кривыми, что объясняется переходом ленты в неотапливаемую часть, не имеющую продольного разделения на 2 секции (правую и левую).

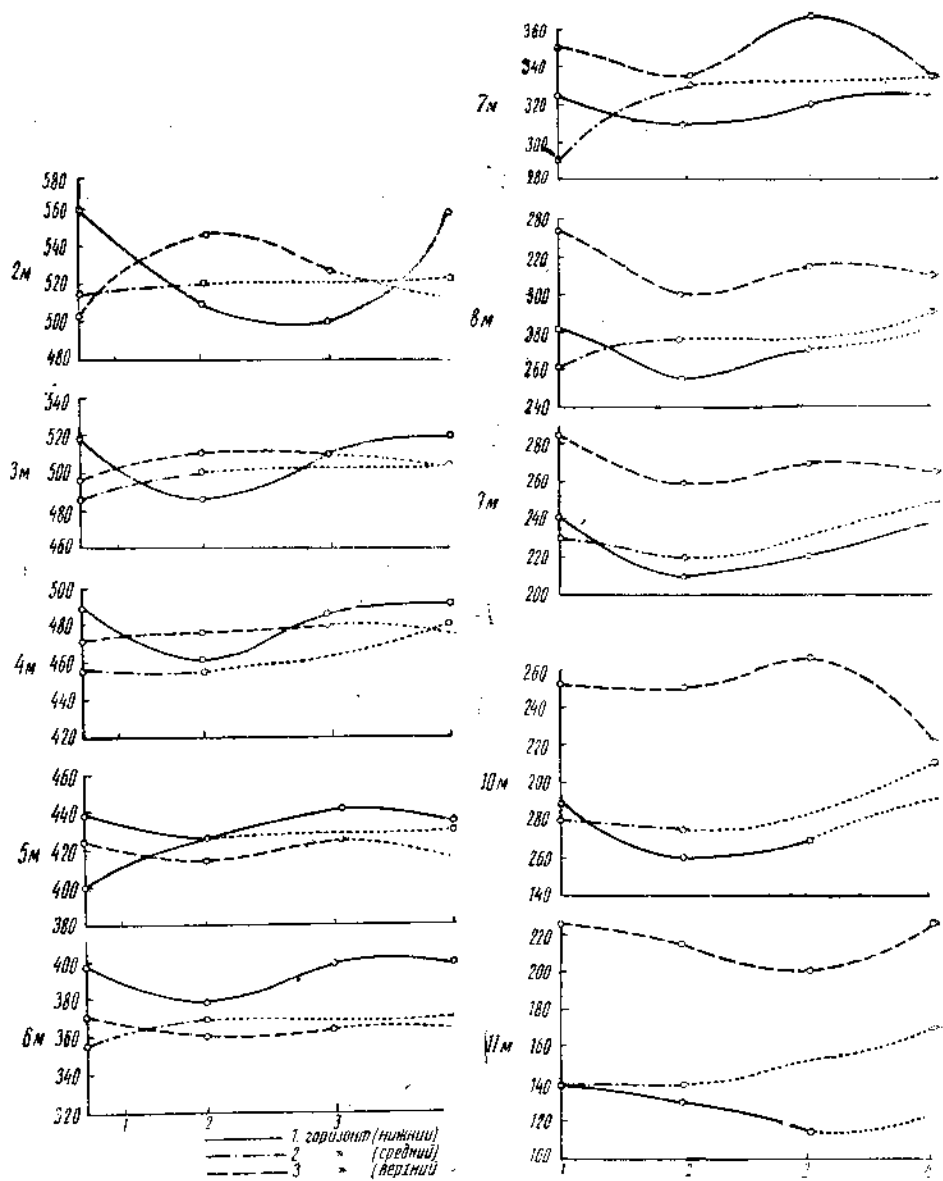
Верхний горизонт, наиболее равномерный, кроме 3-го, 4-го и 5-го м, все остальные обнаруживают разницу в показаниях отдельных точек не больше 20°.

Средний горизонт по своей неравномерности весьма сходен с нижним, причем необходимо отметить весьма резкое расхождение в средних точках при сравнительно небольшой разнице в крайних пунктах (термопары первая — шестая). До 5-го м II горизонт холоднее нижнего и верхнего; 5-й, 6-й, 7-й и 8-й м представляют скрещивание, переплетение всех трех горизонтов, а начиная с 9-го по 13-й горизонты идут не пересекаясь; таким же характером обладают кривые по 3-му и 4-му м. Как вывод из анализа распределения по всем 13 м следует, что правая сторона обладает большей равномерностью температур по отдельным горизонтам, чем левая.

Режим ГЭИС. Распределение температур здесь значительно лучше и изменение температур носит более закономерный характер. Если на 2-м, 3-м, и 4-м м еще наблюдается переплетение кривых, то, начиная с 5-го и до конца, т. е. на 13-м, этого скрещивания почти не наблюдается. Наиболее высокая температура по III верхнему горизонту, в котором остается лишь одна точка (вторая слева), легко объясняется перенесением факела

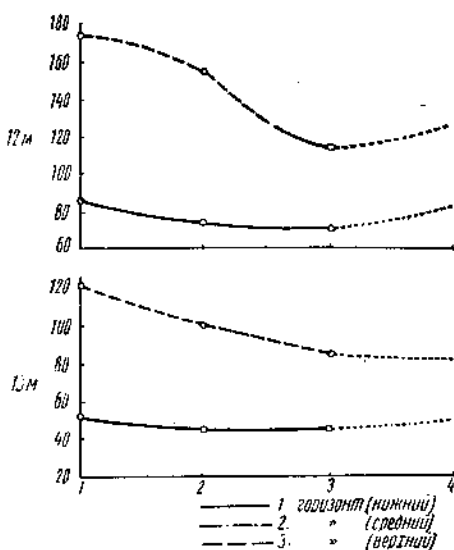


Граф. 10. Распределение температур поперек муфеля лера (заводский режим).



Граф. 11. Распределение температур поперек муфеля лера (режим ГЭИС).

пламени. Колебания между значениями по отдельным горизонтам не превышают 20%; с 9 метра наблюдается сильное расхождение кривых, причем рядом идут и качественно одинаково изменяются I и II горизонты. Так как после 8 метра лер не отапливается, то это явление (температурное остывание среднего горизонта) легко объясняется относительным снижением температуры по верху и по низу за счет интенсивного охлаждения лучеиспусканием термопар на холодный свод и под лер. Более форсированный режим отопления при методе, предложенном ГЭИС, сказывается в увеличении температуры левых точек по нижнему и верхнему горизонтам.



Граф. 11а. Распределение температур поперек муфеля лера (режим ГЭИС).

Анализируя совокупность всех трех горизонтов, необходимо констатировать, что температурные кривые здесь идут значительно компактнее; такая компактность сохраняется на протяжении от 3-го до 7-го м, т. е. главным образом в пределах отапливаемой части лера, охватывая наиболее ответственную область температур отжига — 500—300°. Поперечное распределение этих температур указано на графике 11 и 11а.

Из сказанного вытекает и сравнительный анализ режимов, данные по которому заставляют считать режим ГЭИС более правильным и дающим лучшую равномерность в температурном распределении по всему поперечному сечению лера.

3. Связь между распределением температуры внутри лера и конструкцией лера

Из приведенного выше можно сделать ряд выводов в отношении влияния отдельных конструктивных элементов лера на тепловой режим печного пространства. Прежде всего легко проследить влияние обогревательных камер. Они расположены в передней части лера на протяжении всего 7 м, из которых 3,3 м приходится на первую огневую коробку, 2 м — на вторую и 1,7 — на горизонтальный боров, в конце которого помещена дымовая труба.

Анализ изменения падения температур (графики 4, 5 и табл. 1, 2) показывает, что после 5-го м темпы падения температур снижаются, что совпадает с выходом товара за пределы камеры. Плавный переход температурной кривой между 2-м и 4-м м указывает на достаточно совершенную канализацию топочных газов

вокруг муфеля, без резких падений или повышений температуры внутри лера (в среднем по всем горизонтам). Сказанное касается в одинаковой мере обоих режимов, несмотря на разницу в регулировке пламени.

После 5-го метра изделия выходят из собственно муфеля и вступают в неотапливаемую часть с менее теплопроводными стенками, что сказывается в большей равномерности поперечного распределения температур, в затухании величины падения и одновременно в расслоении температур по отдельным горизонтам.

Последнее обстоятельство, иллюстрируемое графиками 7 и 9, связано с конфигурацией сводового перекрытия этой части лера, с наличием там локов и подсоса воздуха. Присутствие остывающих изделий повышает температуру ленты и нижнего горизонта, благодаря чему эти температуры оказываются выше температур среднего горизонта.

В то же время на показания термопар верхнего горизонта сказывает влияние очертание свода лера, состоящего из поперечных сводиков. При сопоставлении температурных кривых с положением сводиков обнаруживается, что хорошо заметные «пики» кривой в числе 5 совпадают с 7-м, 8-м, 9-м, 10-м, 11-м и 13-м м по длине лера; как раз в этих местах расположены поперечные балки, поддерживающие пять сводиков. Близость этой нагретой металлической массы и обуславливает перегрев термопар при их прохождении.

Таким образом следует указать, что температурные кривые по длине лера различны в отдельных своих частях. Наиболее высокая температура на 2-м—3-м м. Здесь она стабильна, с минимальной разницей по отдельным горизонтам и длине поперечного сечения. Далее следует компактный участок, где кривые дают наиболее концентрированный пучок; его положение в лере зависит от режима; при заводском он простирается примерно от 4-го до 8-го м, при режиме ГЭИС — от 3-го до 6-го м. В области неотапливаемой части лера («холодной») замечается заметное расслоение температурных кривых, подчеркнутое «пиками» верхнего горизонта; на графиках 10 и 11, где изображено поперечное распределение температур, это видно наиболее четко.

4. Влияние положения факела (регулировки пламени) на температурную кривую лера

Так как качество выходящей из лера продукции определяется правильным выбором и получением соответствующей температурной кривой, то естественно, что изменения ее можно было достигнуть, варьируя положением факела. Из графика 8 видно, что отличие режима ГЭИС от заводского заключалось в повышении температуры в камере сгорания, с перемещением максимума температуры к концу лера. Это повлекло за собой повышение температуры в самом лере, в головном его участке, на 25—30°, способствовало стабилизации температуры и более компактному распределению ее по отдельным горизонтам, и выравнило темпы

падения температур, сделав кривую южнга более плавной. Целесообразность подобного изменения устанавливается сравнением величины брака сжига в обоих случаях, о чем будет сказано ниже.

Сопоставление с температурной кривой, данной самой фирмой «Симплекс», показывает более полное совпадение с ней именно режима ГЭИС.

5. Температура входа и выхода изделий и ленты конвейера

Ввиду того, что изделия (бутылки) поступают в лер нагретыми, являясь самостоятельным фактором баланса, и обладают иной теплоемкостью и теплопроводностью, нежели обогревающая их среда (газ), интересно проследить с точки зрения процесса отжига температуру самой бутылки. Вместе с тем по условиям передвижения бутылка находится в состоянии непосредственного теплообмена с металлической планкой конвейера, на которую она и ставится, в силу чего следует проследить и за температурой самой ленты. Косвенно ее текущая температура фиксировалась «сквозными» термопарами на нижнем горизонте, находящимися от нее на расстоянии всего 10—20 м.м.

При опытах по заводскому режиму (пять пропусков сквозных термопар) температура входящей в лер бутылки колебалась между 580—590°; при режиме ГЭИС следует принять такую же температуру (см. далее — тепловой баланс). При прохождении бутылки ее температура не измерялась, и только по выходе бутылки из лера на расстояниях от 2 до 5 м через каждые 0,5 м вытаскивалось по 1 бутылке с краев и с середины, в которые погружались ртутные термометры для измерения температуры внутри бутылки.

Таблица 4

Температуры внутри бутылки (при заводском режиме в °C)

Расстояние от выходн. конца лера	2 м	2,5 м	3 м	3,5 м	4 м	4,5 м	5 м	Примечание
Правая сторона .	35	28	26	38	48	54	56	Мало бутылки
Середина	30	33	25	47	63	80	88	
Левая сторона . .	44	42	55	63	74	93	98	

Разная температура бутылки, взятых слева и справа, объясняется более холодным режимом правой стенки лера (у наружной стены здания, опыты производились зимой), а также тем, что по устройству пушера по левой стороне идут более горячие бутылки.

ления лера. В таких случаях приходилось вводить добавочное отопление мазутом через торцевую стенку камеры сжигания. Поэтому качество (состав) газа было весьма разнообразно:

Сухой газ

CO CO₂
13—26% 6—12%

H₂ CH₄
6—13% 1—4,5%

O₂ N₂
0,8—0,9% 50—55%

Влажность газа оценивается примерно в 25%; 270 г на 1 м³ газа, смола и пыль—70 г/м³.

Теплотворная способность газа в среднем составляла за все время исследования 900—1000 кал/м³ влажного газа. Температура входа газа в лер—90°. Среднее потребление газа лером выражалось цифрой 0,11—0,20 м³/сек.

Конструкция и расположение газопроводов не позволили точно учитывать колебания в дебете газа, количество которого подсчитывалось по газифицированному топливу и по характеристике дыма (состав, скорость).

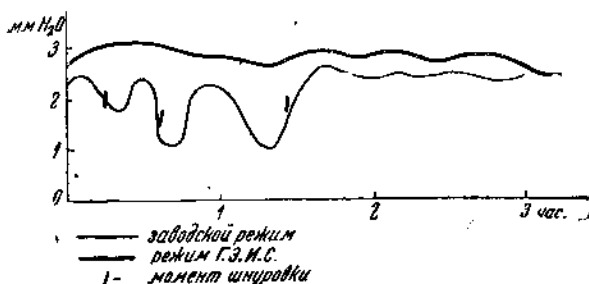
На графике 13 показаны колебания давлений газа в газопроводе. «Провалы» на кривой по заводскому режиму объясняются прогарами. При режиме по ГЭИС благодаря более строгому инструктажу удалось поддерживать кривую давления гораздо более ровную (колебания $\pm 0,3$ мм).

На графике 14 и табл. 5 (см. ниже) дана качественная характеристика генераторного газа за 3 мес. наблюдений.

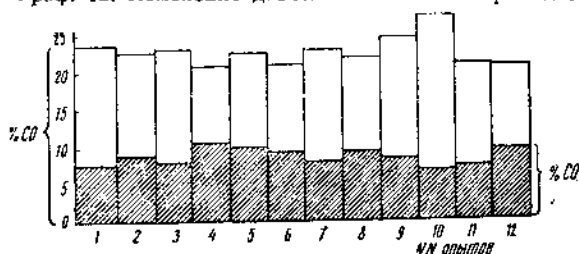
2) Процесс горения. Газ в камеру горения поступает сверху и туда же подведен воздух, подаваемый вентилятором. Полное сгорание (отсутствие CO) получалось впереди входного газового отверстия—у второго демпера, и далее; в передних же углах камеры обнаружались газы «мешки», содержавшие 7—10% CO.

По изменению содержания O₂ в них можно судить о величине засоса. Так, при заводском режиме установлен у первого демпера состав топочных газов (в %):

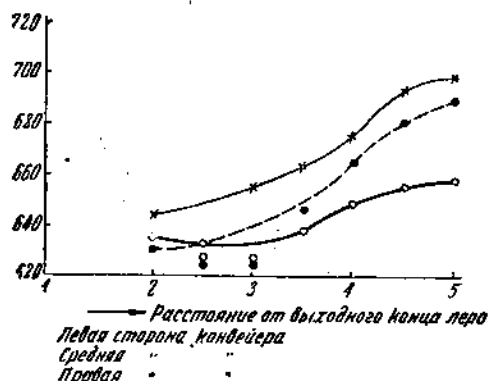
Справа — 16,5% CO₂ 2,5% O₂
Слева — 18,6% CO₂ 0,2% O₂ 1,8% CO



Граф. 13. Изменение давления газа в газопроводе.



Граф. 14. Качественная характеристика генераторного газа во время сквозного пирометража лера.



Граф. 12. Температура бутылок на разных расстояниях от выходного конца лера.

На графике 12 изображены температуры бутылок, взятых из разных мест ленты. Если сопоставить температуру бутылок с температурой газового пространства лера, учитывая, что 5-й метр от конца является 15-м метром от начала, нетрудно убедиться, что бутылки выходят теплее, нежели окружающий их воздух. В отдельных случаях температуры бутылок между 14-м и 15-м м от начала лера имели и более высокую температуру—110—125°, но это

всегда относилось к средней части конвейера, по краям же температура выше 80° не повышалась. При режиме ГЭИС производились лишь отдельные контрольные измерения температуры бутылок, не обнаружившие существенной разницы с вышеприведенными данными.

Температура ленты конвейера, вступающей в муфель, 250—260° при заводском режиме; при измененном (ГЭИС) на 90—100° выше, что объясняется перегревом нижних каналов, отражающимся на более высоком подогреве возвращающейся ленты. Скорость движения ленты колебалась между 0,075 и 0,082 м/мин. (12,2¹—13,3¹ м) при заводском режиме, и между 0,067 и 0,072 м/мин. при режиме ГЭИС. Разница между средними значениями дает уменьшение производительности (или удлинение времени южига) на 9%: это изменение, а также и перемещение фокуса горения определило более плавную кривую отжига. По отдельным опытам скорость составляла (в м/мин.).

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
Заводский режим	0,8	0,77	0,8	0,8	0,77	0,75	0,75
Режим ГЭИС	0,75	0,67	0,67	0,71			

Д. Анализ газовой среды

С целью установления рационального отопления лера газом, надо изучить процесс горения в нем топлива, проследив все изменения, претерпеваемые топливными газами в лере, поскольку эта характеристика обуславливает тепловой баланс его.

1) Лер отапливается генераторным дровяным газом, получаемым в отдельном простом генераторе на естественной тяге. Дрова—смесь березы с осиной, с общей средней влажностью от 40 до 60% (см. табл. 1, приложения). Режим генератора оставляет желать много лучшего, ибо весьма часто наблюдались прогары (слой топлива 1,5 м), весьма резко снижавшие качество генераторного газа и расстраивавшие налаженный режим ютоп-

ления лера. В таких случаях приходилось вводить дополнительное отопление мазутом через торцевую стенку камеры сжигания. Поэтому качество (состав) газа было весьма разнообразно:

Сухой газ

CO CO₂
13—26% 6—12%

H₂ CH₄
6—13% 1—4,5%

O₂ N₂
0,8—0,9% 50—55%

Влажность газа оценивается примерно в 25%; 270 г на 1 м³ газа, смола и пыль—70 г/м³.

Теплотворная способность газа в среднем составляла за все время исследования 900—1000 кал/м³ влажного газа. Температура входа газа в лер—90°. Среднее потребление газа лером выражалось цифрой 0,11—0,20 м³/сек.

Конструкция и расположение газопроводов не позволили точно учитывать колебания в дебете газа; количество которого подсчитывалось по газифицированному топливу и по характеристике дыма (состав, скорость).

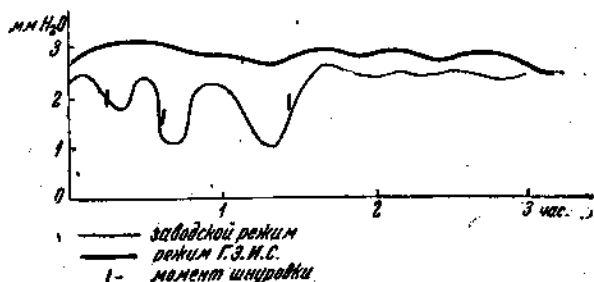
На графике 13 показаны колебания давлений газа в газопроводе. «Провалы» на кривой по заводскому режиму объясняются прогарами. При режиме по ГЭИС благодаря более строгому инструктажу удалось поддерживать кривую давления гораздо более ровную (колебания $\pm 0,3$ мм).

На графике 14 и табл. 5 (см. ниже) дана качественная характеристика генераторного газа за 3 мес. наблюдений.

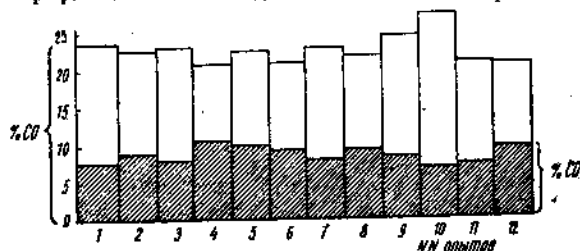
2) Процесс горения. Газ в камеру горения поступает сверху и туда же подведен воздух, подаваемый вентилятором. Полное сгорание (отсутствие CO) получалось впереди входного газового отверстия—у второго демпера, и далее; в передних же углах камеры обнаружались газовые «мешки», содержавшие 7—10% CO.

По изменению содержания O₂ в них можно судить о величине засоса. Так, при заводском режиме установлен у первого демпера состав топочных газов (в %):

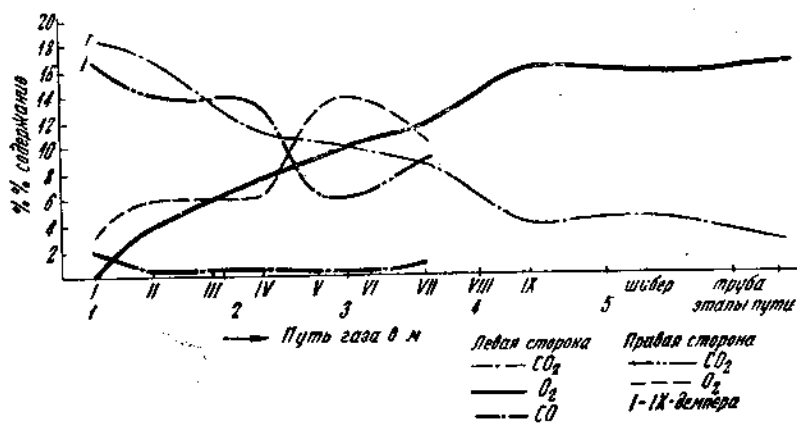
Справа — 16,5% CO₂ 2,5% O₂
Слева — 18,6% CO₂ 0,2% O₂ 1,8% CO



Граф. 13. Изменение давления газа в газопроводе.



Граф. 14. Качественная характеристика генераторного газа во время сквозного пирометража лера.



Граф. 15. Результаты годового анализа и по демперам (правая и левая сторона лера) (заводский режим).

Однако уже внизу IV демперного канала процент значительно меняется:

	CO_2	O_2	CO
справа —	13,0	6	
слева —	11,4	8	0,2

Внизу VI демпера:

	CO_2	O_2	CO
справа —	6,4	14	
слева —	10,0	10,5	0,1

Внизу VII демпера:

	CO_2	O_2	CO
справа —	9,2	10,4	
слева —	9,0	11,0	0,3

Такая перемена в нарастании «а» у правого демпера объясняется, во-первых, значительно худшей тягой, а во-вторых, изменением направления газов: между VI и VII демперами находится стенка, отделяющая первую топочную камеру от второй; в-третьих, правые вертикальные каналы были весьма засорены плотными налетами сажи в виде плиток толщиной 4—5 см; эти сажистые твердые скопления являются результатом очень примитивного нефтяного отопления, не обеспечивающего полноты горения. Как вывод из указанных цифр и из графика 15 следует, что левая сторона лера работала под большей тягой, засасывая и большие количества воздуха, что обуславливало повышение α и снижение процента CO_2 . Это подтверждается и измерением тяги, о чем будет сказано ниже. Более интенсивная канализация дыма у левой стороны лера несомненно служила причиной и относительного перегрева ее, на что указывают температурные кривые. В результате коэффициент избытка воздуха при режиме ГЭИС, постепенно увеличиваясь, достигал значения 3—3,5 на левой и

2,5—3,0 на правой стороне дера. Такую величину α следует считать несомненно высокой, ведущей к излишней трате топлива и объясняемой в данном случае нарушением плотности кладки (поврежденные и треснувшие карбофраксовые плиты, разошедшиеся швы наружной кладки и т. п.). Согласно графику 18, при заводском режиме коэффициент избытка воздуха достигал значения 5—6, что одновременно при более повышенной температуре дыма (см. график 3) обуславливало больший расход топлива.

Таблица 5

Состав влажного газа
(средние месячные анализы)

Опыты Компонент	Янв.	Янв.	Февр.	Февр.	Март	Март	В среднем
CO ₂	5,47	7,65	6,97	5,73	6,15	5,00	6,16
CO	17,60	15,45	15,60	17,00	18,28	19,00	17,15
O ₂	0,60	0,68	0,68	0,70	0,60	0,60	0,64
H ₂	8,54	10,42	8,96	8,40	8,27	6,47	8,52
CH ₄	3,08	1,32	2,03	3,00	3,10	2,28	2,47
N ₂	39,53	39,48	40,74	40,07	38,76	41,57	40,02
H ₂ O	25,18	25,0	25,02	25,10	24,84	25,08	25,04

$$Q_{\text{раб}}^{\text{макс}} = 1045 \text{ кал/м}^3 : Q_{\text{раб}}^{\text{мин}} = 860 \text{ кал/м}^3$$

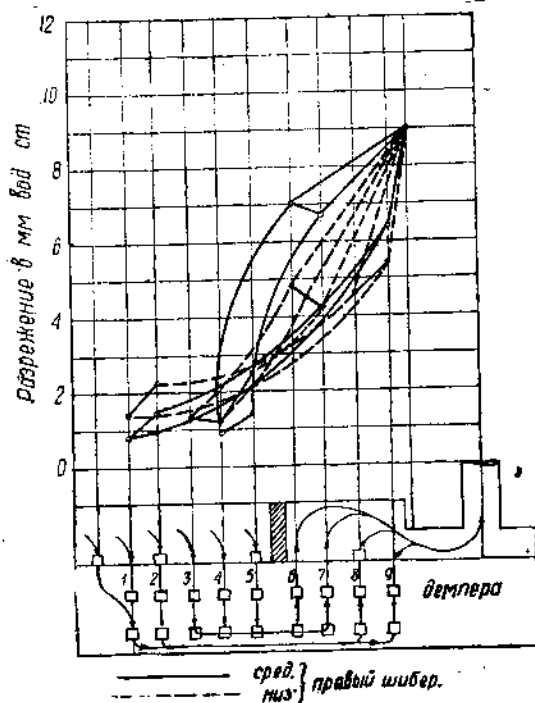
Е. Гидравлическая характеристика

1) Изменение тяги в различных участках пути дымовых газов фиксировалось на различных горизонтах в системе демперов. Схема движения дыма видна на графиках 16, 16а и 17, 17а, иллюстрирующих степень возрастания тяги. Так как из 1-й топочной камеры газы уходят 5 параллельными потоками (с каждой стороны), то разрежение здесь почти одинаковое, несколько большее внизу, поскольку в самом топочном пространстве может быть положительное или нулевое давление.

Однако разрежение весьма возрастает при переходе газов из 1-й во 2-ю топочную камеру: с 2 мм почти до 8 мм, причем при заводском режиме большая величина разрежения приходилась на левую сторону, а при режиме ГЭИС — на правую, что явилось результатом некоторого упорядочения регулировки шиберами.

По абсолютной величине разрежения оба режима мало отличались друг от друга, что иллюстрируется указанными выше графиками (16 и 17).

Резкое увеличение тяги у VI демпера соответствует и увеличению α , дающей здесь максимальный рост. В самой трубе разрежение равнялось в среднем 12—13 мм вод. столба. Изменение величины α приведено на графике 18, из которого видно, что левая сторона все время характеризовалась повышенным α (больше разрежение).



Граф. 16. Разрежение отходящих газов по длине лера (заводский режим).

Скорости проходящих дымовых газов непосредственно подсчитать нельзя, имея в виду сложную конфигурацию каналов, однако на основе температурных данных можно подсчитать примерную скорость в демперах и нижних подовых каналах. Они составляют в демперах примерно от 3 до 5 м/сек, внизу 3—4 м/сек. В дымовой трубе, с учетом температуры дыма (см. график 4), скорости равны при различных количествах газа 1,5—2,4 м/сек. Определение скорости производилось трубкой Пито, которая, как известно, при небольших величинах скоростей не дает достоверных показаний. Поэтому на значение полученных скоростей, а также на вытекающие из них объемы

проходящих газов следует смотреть как на ориентировочные, важные с точки зрения порядка, величины.

Ж. Определение качества изделий

С целью установления рационального режима отжига следовало прежде всего определить процент брака по причине плохого отжига как при заводском, так и измененном режиме, ибо только улучшение качественных показателей являлось бы доказательным преимуществом режима ГЭИС.

1. Метод контроля

Метод контроля заключался в отборе бутылок в 3 местах по ширине лера (середина, справа, слева) во все время пропуска сквозных термопар. В среднем по каждому испытанию бралось 21—36 бутылок.

По заводскому режиму:

№ опыта —	1	2	3	4	5	6
Число бутылок —	48	36	39	45	27	24

По режиму ГЭИС:

№ опыта —	1	2	3	4	5
Число бутылок —	22	24	15	24	21

В дальнейшем взятые бутылки подвергались осмотру, сортировке, браковке и соответствующему циклу испытания (см. табл. 6а).

2. Учет производительности лера

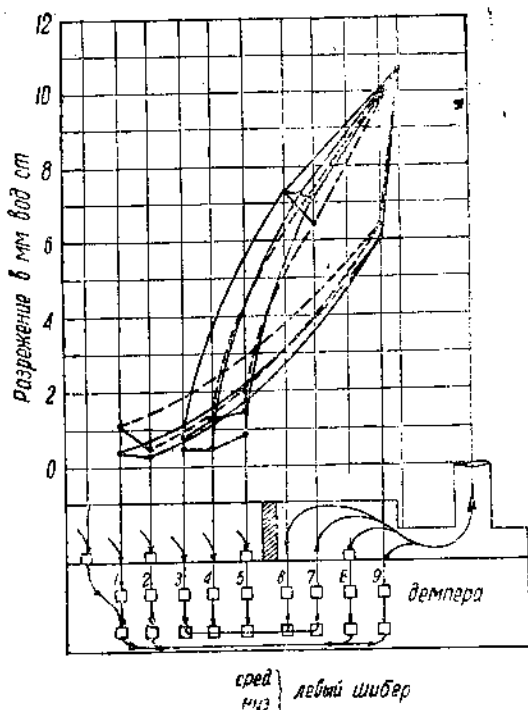
Учет производительности лера во время опытов велся таким образом, что как только головная часть прибора показывалась у выхода лера, начинался подсчет изделий, подаваемых конвейером, продолжавшийся до выхода холодного конца термопар.

3. Определение качества выпускаемой продукции

Отобранные образцы подвергались следующим операциям:

а) внешнему осмотру для определения качества стекла (камень, рух и т. п.). С этой стороны получается характеристика, приводимая ниже;

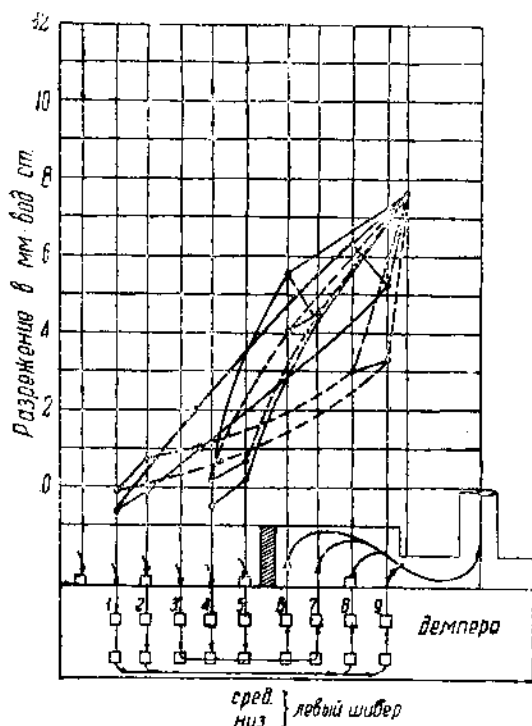
б) взвешиванию каждой из них с вычислением средней величины, оказавшейся равной 566 г;



Граф. 16а. Разрезание отходящих газов по длине лера (заводский режим).

Таблица 6

№ опыта	Общее количество бутылок	И з н и х					Доброкачественная продукция
		Пузырь	Рух	Мошка	Камень, шамотн.	Камень, матер.	
Режим завода:							
1	48	6	—	—	4	10	32
2	36	19	2	—	11	14	11
3	39	35	—	—	9	10	4
4	45	6	45	45	9	9	—
5	27	8	2	27	23	27	—
6	24	1	—	24	3	6	—
Режим ГЭИС:							
1	22	22	—	—	—	5	—
2	15	10	5	—	—	10	—
3	24	6	—	—	2	11	11
4	21	14	1	—	3	7	6



граф. 17. Разрежение отходящих газов по длине лера (режим ГЭИС).

с отжигом, который надо ориентировать по наибольшей толщине;

Примечание. Все бутылки имели неровное дно, причем толщина его менялась от одного края к другому в пределах от 4—6 до 8—12 мм.

е) полярископическому испытанию всей бутылки для определения степени отжига.

Ввиду отсутствия количественного критерия для измерения степени отжига по характеру преломления лучей в аппарате — этот тип испытания не фиксировался. Следует указать, что, согласно принятым нормам, выпускаемая годная продукция все же на полярископе давала картину наличия натяжений, но поскольку образцы выдерживали указанные испытания, изделия признавались годными.

Сопоставляя данные по сортировке и разбраковке продукции за время опытов, получаем следующие результаты (табл. на стр. 240).

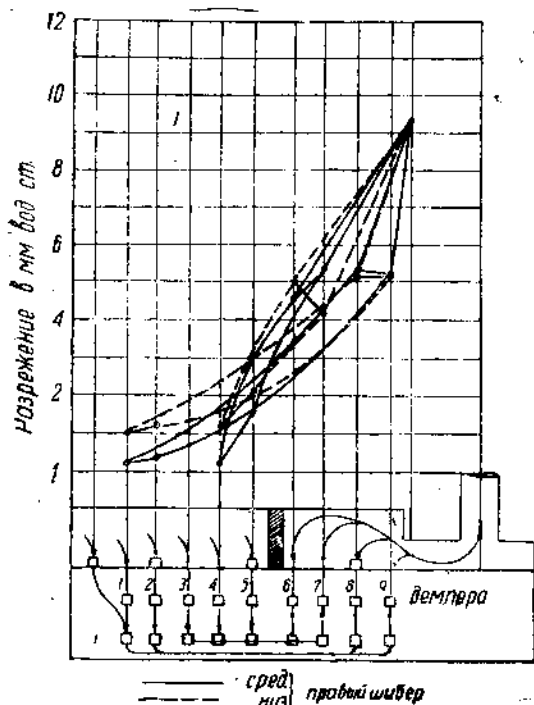
Следовательно при новом режиме ГЭИС процент брака отжига снизился до 6,4%, т. е. почти вдвое уменьшился, при этом количество пропущенной продукции увеличилось более, чем на 50%.

В этом и заключается преимущество выбранного режима, еще более подкрепляемое тем соображением, что расход топлива при этом не возрос, а наоборот, снизился, как это будет показано далее.

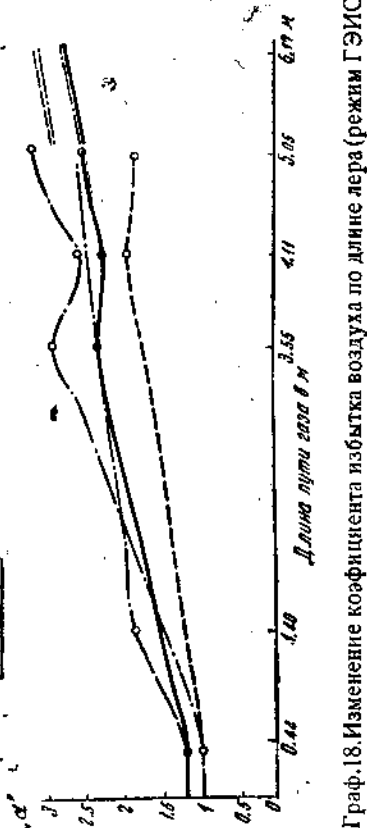
в) определение термической устойчивости изделий; делалось это следующим образом: бутылки, имея температуру окружающего воздуха (4—5°C), спускались в горячую воду с температурой 78—85°, при этом почти все бутылки испытание выдержали;

г) испытанию механической устойчивости после термического испытания путем воздействия давления изнутри при помощи особого гидравлического прибора; в среднем все бутылки выдержали давление от 15 до 25 ат;

д) определению толщины стенок при помощи микрометра, которое показало, что в среднем толщина стенок бутылок колебалась между 2 и 4,5 мм, что несомненно указывает на затруднение



Граф. 17а. Разрежение отходящих газов по длине лера (режим ГЭИС).



Граф. 18. Изменение коэффициента избытка воздуха по длине лера (режим ГЭИС).

IV. Выводы

А. Значение метода сквозного пирометража

Применение сквозного пирометража в печах с подвижным полом, каковым является целый ряд отжигательных и туннельных печей, уже не раз оправдало себя, дав обширный материал, вносящий поправки на регулировку режима и конструкцию печи или отдельных ее деталей.

Изложенные здесь испытания только лишний раз подтвердили целесообразность этого метода, как весьма плодотворного, легко осуществляемого на практике.

Основная ценность такого пирометрирования заключается в принципе непрерывности показаний, что дает возможность вносить коррективы в режим при полном знании условий предшествующих и следующих за рассматриваемым моментом явлений.

Вместе с тем и самый прибор, предложенный и осуществленный проф. В. Э. Бромлей, вполне оправдал свое назначение, претерпев лишь ряд второстепенных изменений в сторону увеличения срока эксплуатации.

Заводский режим

№№ опытов	Наименова- ние	Сорта			Б р а к									
		1	2	3	Посечка горла	Проду- то дно	Разно- стен.	Камень	Посечка	Бой	Всего годных	Всего боя	Всего	
1-й	Количество %	1600 55,2	200 6,9	—	675 23,3	—	—	258 8,9	—	165 5,7	1800 62,1	1098 37,9	2898 100,0	
2-й	Количество %	600 37,9	300 18,9	—	232 14,6	103 6,1	175 11,0	—	47 2,9	127 8,0	900 56,8	684 43,2	1584 100,0	
3-й	Количество %	200 15,2	100 7,6	400 30,3	165 12,7	65 4,9	145 11,0	77 5,8	38 2,9	126 9,6	700 53,1	618 46,9	1318 100,0	
4-й	Количество %	— —	— —	1400 80,6	92 5,3	25 1,4	—	90 5,2	—	128 1,4	1400 80,6	335 10,4	1735 100,0	
5-й	Количество %	100 16,5	— —	200 32,9	80 13,2	27 4,5	90 14,8	10 1,7	—	100 16,5	300 49,4	307 50,6	607 100,0	
6-й	Количество %	400 28,0	200 14,0	100 7,0	145 10,2	48 3,4	80 5,6	40 2,8	30 2,1	385 26,9	700 49,0	728 51,0	1428 100,0	
Всего в ср.	Количество %	2900 30,3	800 8,4	2100 21,9	1389 14,5	268 2,8	490 5,1	475 5,0	115 1,2	1031 10,8	5800 60,6	3770 39,4	9570 100,0	

Примечание. Таким образом, считая, что брак отжига обнаруживается в бое и посечках, получаем всего 12% брака отжига по 6 проведенным испытаниям.

Режим ГЭИС

№№ опы- тов	Наименование	Сорта			Б р а к								
		1	2	3	Посечка горла	Проду- то дно	Разно- стен.	Камень	Посечка	Бой	Всего годных	Всего боя	Всего
1-й	Колич. %	1700 86,9	100 5,1	—	10 0,5	55 2,8	—	—	—	90 4,6	1800 92,1	155 7,9	1955 100,0
2-й	Колич. %	—	1300 67,9	100 5,2	—	Крив. 90 4,7	165 8,6	—	165 8,6	95 4,9	1400 73,1	515 26,9	1915 100,0
3-й	Колич. %	100 3,5	2200 77,5	100 3,5	40 1,4	—	—	—	—	400 14,7	2400 84,5	440 15,5	2840 100,0
4-й	Колич. %	3200 80,9	400 10,1	—	75 1,9	46 1,2	42 1,1	62 1,6	Брак маш. 28 0,7	100 2,5	3600 91,1	353 8,9	3953 100,0
5-й	Колич. %	3800 90,6	200 4,8	—	45 1,1	21 0,5	Пл. гор. 25 0,7	—	—	100 2,4	4000 95,4	191 4,6	4191 100,0
Всего	Колич. %	8800 59,3	4200 28,3	200 1,3	170 1,3	213 1,4	232 1,6	62 0,4	165 1,1	785 5,3	13200 88,9	1654 11,2	14854 100,0

Б. Метод и условия рационального проведения сквозного пирометража

Описанное выше исследование, потребовавшее около полутора десятка пропусков прибора через лер, явилось хорошей школой по усвоению рациональных методов пирометража. Это прежде всего касается сокращения зондирующих пропусков, поскольку опыт позволяет уже на основе показаний стационарных термодатчиков фиксировать внимание на отдельной группе явлений, суживая и сокращая исследование. Кроме того, как вывод, следует упомянуть, что тонкие железо-константановые проволоки не являются подходящими для этой цели и что необходимо иметь более толстые проволоки (2 и 4 мм), сохраняющиеся неизменными на больший срок.

Далее, как вывод, можно указать, что достаточно 12 термопар (вместо 18) и что запись показаний может быть сделана реже, т. е. каждые 5 мин. Что касается стандартных термопар, то последних должно быть 5 наверху (по 2 в двух топочных камерах и 1 у цоколя трубы) и 4 внизу (по 2 с каждой стороны лера, для контроля равномерности действия симметричных демперов).

В тех же точках следует проверять и тягу и исследовать (периодически) состав топочных газов. Если нельзя поставить непосредственного учета топлива, то необходимо измерять скорость дымовых газов в трубе.

В. Теплотехническая характеристика исследованного лера «Симплекс»

1. Распределение температур по горизонтам и в поперечном направлении

Полученные кривые температур показывают, что в изученном лере можно получить надлежащее распределение температуры вдоль, удовлетворяющее кривым отжига, даваемым фирмой, причем изменение температур достаточно плавное.

В поперечном направлении известная неравномерность наблюдается в связи с нарушением целостности отдельных карбофраксовых плит.

«Расслоение» температур по горизонтам наиболее резко в неотапливаемой части, особенно для верхнего горизонта. С этим можно бороться, не допуская подсоса воздуха под ленту лера и тем самым повышая температуру нижнего горизонта.

2. Связь распределения температур с конструкцией

Эта связь ясно дает себя чувствовать главным образом в области отапливаемой части, где требуется поддержание высоких температур.

Исходя из влияния замены карбофраксовых плит шамотными, менее теплопроводными, можно допустить возможность отказаться в некоторых частях муфеля от карбофракса, составив например свод муфеля из шамотных плит; вместе с тем во вто-

рой части муфеля все плиты можно заменить чугунными, не боясь их быстрого выпорания (температура обогревающего газа не выше 650°).

Измеренные температуры бутылок по их выходе из лера показывают, что без всякого ущерба для их качества можно сократить длину лера, учитывая сохранение практикуемой производительности. Уменьшив длину на 3—4 м, получим температуру выходящей бутылки в 40—50°, считая, что небольшой и искусственно регулируемый подсос воздуха ускорит падение температуры на последних 2-х—4-х метрах длины (ср. падение температуры по люкам).

3. Процесс и регулировка горения

Анализ топочных газов по пути их от камеры сжигания до трубы обнаруживает полное горение (при газовом отоплении). В дальнейшем решающим фактором является возрастание α , определяющее температуру газов и величину разрежения (скорости). Следует полагать, что найденные величины α характеризуют нежелательный присос паразитного воздуха сквозь неплотности кладки. Уничтожив лишний присос, получим экономию топлива при сохранении прежнего температурного режима. Считая, что при уплотнении можно получить у цоколя трубы $\alpha = 1,7$, вместо наблюдаемого теперь $\alpha = 3,4$, достигаем экономии топлива $\sim 30\%$.

Отсюда необходимо заключить о чрезвычайной важности отсутствия излишнего воздуха в установке, работающей по существу с нулевым коэффициентом полезного действия.

Регулировка процесса горения с точки зрения величины тяги также не может быть сочтена удовлетворительной, поскольку засоренность демперов и неплотность шиберов не позволяли создать равномерный обогрев по поперечному направлению, обусловив и разную величину α по обеим сторонам муфеля.

4. Тепловой баланс

Тепловой баланс является завершающим этапом теплотехнического изучения, позволяющим оценить технико-экономическое значение отдельных факторов, его составляющих. Следует упомянуть, что в югнотении отжигательной печи понятие о коэффициенте полезного действия является фикцией, ибо на нагрев полуфабриката не затрачивается извне никакого тепла: бутылки поступают в лер более нагретыми, чем выходят оттуда. Поэтому для данного случая нужно вместо к. п. д. взять удельный расход топлива, сравнивая его при различной работе.

Для составления тепловых балансов необходимо было определить часовой дебет генераторного газа, который и был получен по составу и скорости дымовых газов. Остальные данные уже имелись. В таблице 6 приведены по месяцам и отдельным режимам (заводскому и ГЭИС) значения составляющих баланс факторов и среднее интерполированное значение их.

Таблица 6а

*Факторы теплового баланса лера за время испытания по общим режимам
(январь—февраль—март)*

Факторы баланса	Зав. режим		Режим		ГЭИС		Среднее	
	январь		февр.		март		завод- ский режим	режим ГЭИС
Колич. газа м ³ /ч	666	716	443	368	388	432	690	403
Температура газа °С	90	90	90	90	90	90	90	90
Колич. дыма м ³ /ч.	1980	2100	1330	1330	1440	1400	2040	1375
Температура дыма °С	475	490	500	480	452	484	483	479
Коэф. изб. возд.	2,21	2,88	3,00	3,4	3,28	2,83	2,55	3,13
Кол. бутылок.	780	760	780	780	780	780	770	780
Температ. входа бутылок.	581°	594°	590°	592°	590°	595	588°	592°
Вес бут. в г.	590	572	570	560	550	570°	581	563
Температура входа ленты	243°	257°	340°	343°	345°	348°	250°	344°
Температ. выхода бутылок	25°	25°	21°	215°	25°	25°	25°	24°

На основе их составленные балансы приводятся ниже. При этом следует учесть, что скорость ленты при переходе от одного режима к другому была изменена в сторону уменьшения в среднем за весь период испытания на 9%. (1 м при заводском режиме проходил в 12'48", а при режиме ГЭИС — в 14'12").

Тепловой баланс

Статьи баланса	Январь	Февраль	Март	Среднее		Примечание
				По заводскому режиму	По режиму ГЭИС	
I. Приход	%	%	%	%	%	
1. Тепло, внос. генгазом	89,0	82,1	84,0	89,7	83,1	Цифры относятся к 1 часу времени 1 Воздух принят входящим при 20 $^{\circ}\text{C}$.
2. " " воздухом	0,4	0,7	0,5	0,4	0,6	
3. " " бутылками	9,9	17,2	17,2	9,9	16,3	
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
II. Расход						
1. Тепло, унос. дымом	44,0	48,2	46,9	44,0	47,6	При расчете этой статьи принята т-ра входящей в лер ленты, поскольку она нагревалась при обратном ходе
2. " " бутылками	0,4	0,6	0,7	0,4	0,7	
3. " " лентой	0,9	1,9	1,8	0,9	1,8	
4. Потеря на теплопроводн. лучеиспусканием и конвекц.	64,7	49,3	50,6	54,7	49,9	
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Сопоставление статей показывает, что изменение режима сказалось резче всего на количестве тепла, уносимого лентой; уменьшился расход тепла с дымовыми газами. Величина удельного расхода топлива также претерпела значительное изменение.

Согласно таблице 6, количество газа, затрачиваемого в 1 час, равнялось по заводскому режиму 690 м³, а по режиму ГЭИС — 406 м³. Теплотворная способность газа по заводскому режиму — 970 кал/м³, а при режиме ГЭИС — 1020 кал/м³.

Принимая производительность по заводскому режиму за 1, имеем вследствие изменения скорости ленты уменьшение производительности при режиме ГЭИС — 0,91 (меньше, чем на 9%). Тогда удельный расход топлива будет соответственно:

по заводскому режиму:

$$\frac{690 \times 970}{789 \times 0,581 \times 1} = 1\,425 \text{ кал/кг}$$

по режиму ГЭИС:

$$\frac{405 \times 1020}{780 \times 0,563 \times 0,91} = 1\,035 \text{ кал/кг}$$

Таким образом получается экономия приблизительно в 27%. Следовательно предложенный режим оправдал себя не только в направлении улучшения качества изделий, но и обусловил уменьшение удельного расхода топлива. Если пересчитать расход топлива на единицу годной продукции, то процент экономии, как видно из предыдущего, удвоится, превысив 50%.

Заключение

Мероприятия, которые были выработаны и предложены на основе изучения теплотехнического режима исследованного лера (№ 4), дали вполне определенные благоприятные результаты.

Обобщать же выводы в отношении аналогичных установок можно лишь в направлении тех изменений, которые затрагивают вопросы рационализации процесса горения и использование тепла вообще. К таковым относятся: отопление возможно более сухим генераторным газом из генератора, нормально работающего; отсутствие засосов паразитного воздуха, надлежащее состояние муфеля, тонкое распыление нефти при помощи настоящей форсунки, работа которой вызывается переборами в подаче газа и т. п. Что же касается изменения кривой отжига, то таковая может быть предложена только лишь после контрольного сквозного пиromетража, дающего материал к суждению о характере требуемых изменений. И конечно не всегда сделанное изменение, улучшившее качество отжигаемых изделий, вызовет параллельно и экономию топлива; этот вопрос зависит именно от того, в какую сторону придется менять режим и какими средствами будет достигнуто понижение брака по отжигу и улучшение качества последнего, составляющего назначение и цель работы лера.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Влажность и зольность топлива

Дата анализа	Наименование топлива	Влажность (в %)	Зольность (в %)
23/III—32 г.	Торф	34,86	5,14
	Дрова	50,41	—
24/III—32 „	Торф	41,20	8,00
	Дрова	48,12	0,89
30/III—32 „	Торф	40,74	7,16
	Дрова	38,15	—
5/IV—32 „	Торф	40,48	5,60
	Дрова	51,15	0,30
9/IV—32 „	Торф	37,14	7,24
	Дрова	48,80	—
12/IV—32 „	Торф	43,48	6,24
	Дрова	50,62	0,31
15/IV—32 „	Торф	49,14	0,59
	Дрова	41,19	0,30

Таблица 2

Состав соды

Дата испытания	Песок	Известь	Сода	Шихта
7/I—32 г.	0,00	0,10	92,73	27,93
17/I—32 „	0,02	0,22	90,50	25,69
20/I—32 „	0,06	0,18	91,06	27,37
21/I—32 „	0,10	0,20	92,73	26,50
10/II—32 „	0,10	2,66	94,97	23,46
11/II—32 „	0,08	1,96	97,76	22,34
12/II—32 „	0,10	2,10	95,53	22,90
15/II—32 „	0,08	0,18	96,64	20,11
12/III—32 „	0,08	1,70	94,97	22,34
18/III—32 „	0,04	1,20	98,32	20,66

Таблица 3

Анализ материалов (стекло)

Наименование испытуемых материалов	Гигроскоп. влага	Потери при прокал.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	R ₂ O ₃	CaO	CaCO ₃	MgO	MgCO ₃	R ₂ O	Аналитик
Стекло мех. пр.	—	—	73,30	0,16	0,76	—	10,14	—	0,20	—	15,44	Бурзин
Стекло бутылочн.	—	—	72,33	0,22	0,74	—	10,45	—	0,28	—	15,93	То же
Камень в стекле и в ван. печи.	—	—	58,32	—	—	36,00	0,33	—	след.	—	4,84	„
Стекло бутылочн.	—	—	73,45	0,10	0,58	0,68	10,32	—	0,28	—	15,27	„
„	—	—	71,80	—	—	1,94	9,40	—	0,47	—	17,40	„
„	—	—	71,46	—	—	2,00	9,20	—	1,84	—	16,00	„
„	—	—	72,53	—	—	2,51	8,25	—	0,40	—	16,22	„
Ручного произв.	—	—	79,25	0,10	0,63	0,78	6,90	—	0,12	—	13,85	„

Таблица 4

Анализ материалов (известняк, песок, доломит)

Наименование испытываемых материалов	Гигроскоп. влага	Потери при прокал.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	MgCO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	
Известняк	9,30	—	0,34	0,28	51,37	38,76	—	След.	—	
	0,54	—	2,22	0,60	94,79	1,80	—	—	—	
Песок	8,80	0,04	84,52	5,98	—	0,20	—	0,56	—	
	17,2	2,35	85,23	8,11	—	—	0,49	0,80	1,25	Проба из жилстр. карьера
	0,68	1,25	86,66	8,58	—	—	0,76	0,63	1,06	
Доломит	1,00	—	7,00	1,40	78,33	12,27	—	—	—	

Таблица 5

Анализ № 128/503, стекло № 3 от 14/II 1932 г.

SiO ₂	SO ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Всего (в %)
72,78	0,48	0,03	1,53	0,39	8,15	1,37	1,09	14,37	100,21

Проф. М. Г. Степаненко и инж. М. И. Губин

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА ФИДЕРОВ, ПИТАЮЩИХ АВТОМАТЫ

I. Введение

В связи с развитием и механизацией стекольной промышленности выдвигается чрезвычайно важный вопрос о конструировании наиболее усовершенствованного фидера, дающего возможность получить каплю стабильного веса, одинаковой вязкости и температуры, легко поддающуюся регулировке и минимально зависящую от температурного режима ванной печи.

Так как существующие в настоящее время в СССР фидера этим требованиям полностью не удовлетворяют, то Институт стекла предпринял исследование работы существующих фидеров с целью вскрыть конструктивные недостатки их и способствовать дальнейшему совершенствованию фидеров в объеме указанных требований.

Первый этап работы, т. е. теплотехническое обследование фидеров, было осуществлено в 1933 г., и соответствующие выводы по нему дают основание к определенным конструктивным изменениям. Вторым же этапом исследования — непосредственное конструирование нового фидера на основании этих теплотехнических обследований проводится в настоящее время (1934 г.) лабораторией по механизации при ОСЗ ГЭИС.

Работа первого этапа проводилась по следующим направлениям:

1. Изучение распределений температур газовой среды по длине и высоте фидера.
2. Изучение распределений температур в стекломассе по длине и ширине потока в фидере и возле плунжера.
3. Поверхностный пирометраж стекломассы.
4. Изучение гидравлической характеристики газов.
5. Исследование процесса сгорания топлива в фидере.
6. Установление зависимости режима ванной печи и режима фидера.
7. Нахождение наилучших условий работы фидера.

Обследование фидеров и их изучение проводилось на Опытном стекольном заводе, причем объектами исследования служили фидера системы Прехта и Миллера.

II. Характеристика ванной печи и фидера Миллера

Переливная ванная печь типа «Торпедо» имеет площадь зеркала варочной части 24,21 м² и выработочной части — 11,7 м².

Варочное отделение: внутрен. ширина бас. — 4 200 мм
длина прямоуг. части — 5 200 "
суженной " — 800 "
проток: сечение 300 × 600 мм, длина — 1 100 "
Рабочее отделение: длина суженной части — 750 "
радиус закругления — 2 350 "

Суточная производительность ванной печи в момент обследования фидера Прехта достигала 8—10 т в сутки. В момент же обследования фидера Миллера производительность оказалась сниженной и равнялась 5,8—6 т в сутки.

Печь работала на жидком топливе, сжигая его при помощи механических форсунок системы Котляренко, при давлении 12—13 ат, создаваемом насосом.

Суточный расход мазута 4,4—4,6 т, т. е. удельный расход 0,75. Такой большой расход топлива был вызван, во-первых, сильной изношенностью печи, а во-вторых, наличием 8 холодильников, установленных в варочном бассейне. Удельный же расход топлива в период работы двух фидеров равнялся 0,5 кг/кг стекла, а когда стал работать только один фидер Миллера, то удельный расход увеличился до указанной цифры. Фокус горения был перенесен ближе к экрану. Это было сделано для того, чтобы удержать температуру в рабочей части на уровне 1 250—1 270° С, обеспечивающем нормальную работу фидера.

Температурный режим ванной печи в период обследования колебался в пределах 1 245—1 270° С; максимальное колебание температуры газового пространства в рабочей части печи достигало ± 17°. В результате наблюдения установлено, что среднее давление в фидере Миллера — 0,05 мм водяного столба (колебания в пределах от 0,025 до 0,075 мм водяного столба), а в фидере Прехта — 0,01 мм. Газовый анализ выработочной части бассейна и в обоих фидерах дал следующие результаты (в процентах):

Состав	CO ₂	O ₂	CO
Выработ. часть	— 14,2	1,6	0,4
Фидер	— 13,5	1,6	1,3

Эти данные указывают на достаточно удовлетворительно проходящий процесс горения нефти.

Длина фидера от бруса первого ряда до носовой части у Миллера — 930 мм, у Прехта — 1 708 мм. Толщина слоя стекла массы: у Миллера в чаше — 180 мм, у Прехта — в начале — 90 мм, в середине жолоба — 160 мм и в чаше — 110 мм.

Температура в фидере поддерживается за счет излучения из ванной печи и охлаждения поступающей в фидер стекломассы. Все обследование разделялось на два этапа.

Первый этап заключался в фотографии работы фидера в обычных заводских условиях, а второй — в изучении влияния изменений ряда факторов на режим работы фидера и нащупывание тем самым более целесообразного сочетания условий.

Температурный режим ванной печи как в первом этапе, так и во втором был один и тот же, характеризующийся температурой выработочной части в $1245-1270^{\circ}\text{C}$, но большую часть времени печь работала при температуре $1260-1270^{\circ}$. Устройство и конструкция фидеров приведены на рис. 1, 2, 3, 4.

III. Изучение фидера Миллера (метод и результаты)

Температура газовой среды измерялась по четырем вертикалям в 5 точках на каждой (см. распределение термопар на рис. 1, 2, 3). Первая вертикаль находилась на расстоянии 30 мм от свода ванной печи, вторая — на 300 мм, третья — на 545 мм — и четвертая — на расстоянии 655 мм.

Температура по вертикалям распределялась следующим образом (при этом фидер дополнительно не изолировался).

Вертикаль № 1

1-я точка (верхняя)	1225°
2-я "	1225°
3-я " (средняя)	1225°
4-я "	1227°
5-я " (нижняя)	1230°

Температурного перепада между 1-й, 2-й и 3-й точками нет, но между 3-й и 4-й имеется небольшая разница, отвечающая падению:

$$\frac{1227 - 1225}{7,3} = 0,27^{\circ}/\text{см газовой среды.}$$

Между 4-й и 5-й точками этот перепад несколько больше — $0,33^{\circ}/\text{см газовой среды.}$

Вертикаль № 2

1-я точка	1150°
2-я "	1160°
3-я "	1160°
4-я "	1160°
5-я "	1160°

В этой вертикали имеется перепад только между 1-й и 2-й точками, остальные точки имеют одинаковую температуру:

$$\frac{1160 - 1150}{5,3} = 1,9^{\circ}/\text{см газовой среды.}$$

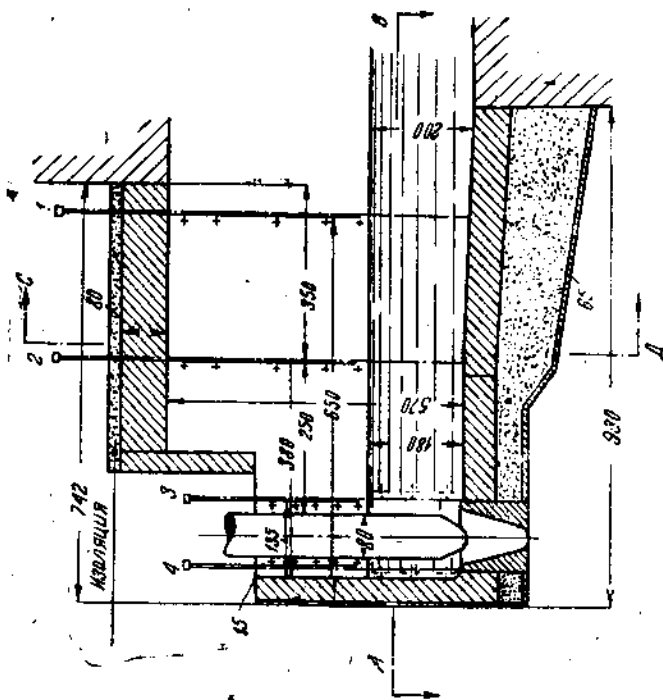


Рис. 1. Схема фидера „Миллер“ (первоначальная конструкция).

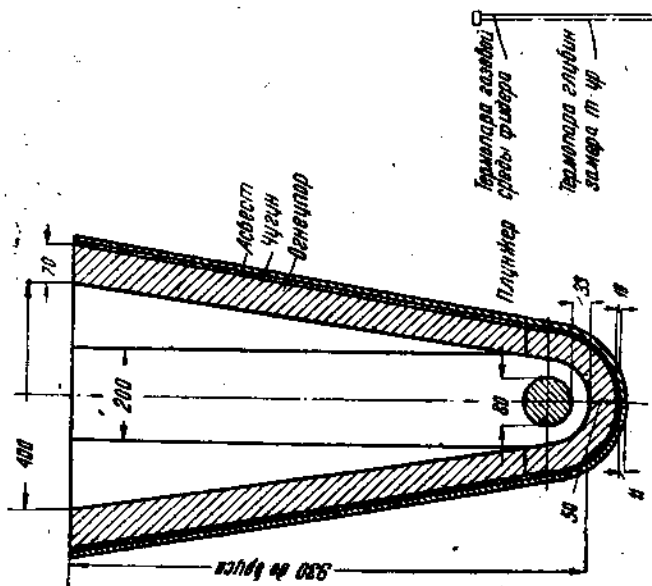


Рис. 2. Основные размеры фидера „Миллер“ (разрез в вертикальной плоскости АА').

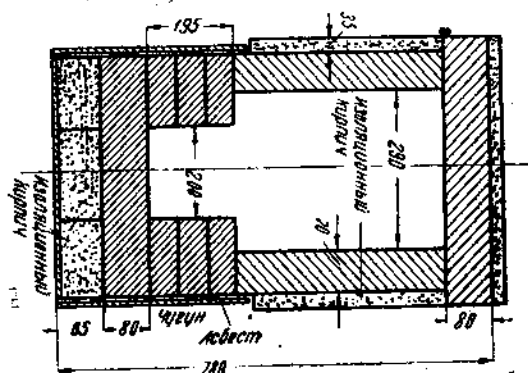


Рис. 3. Основные размеры фидера „Миллер“ (разрез по вертикали C-C)

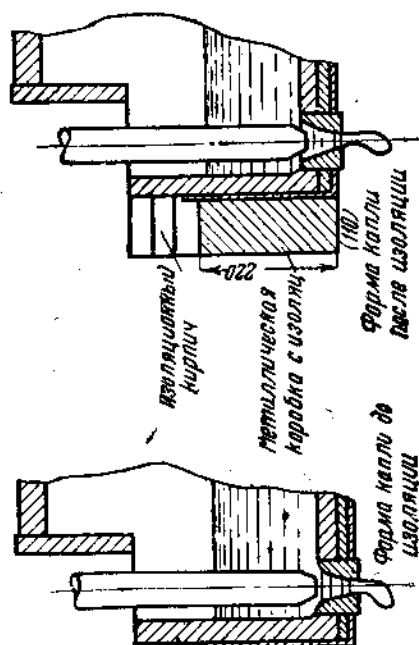


Рис. 4. Схема носовой части фидера „Миллер“.

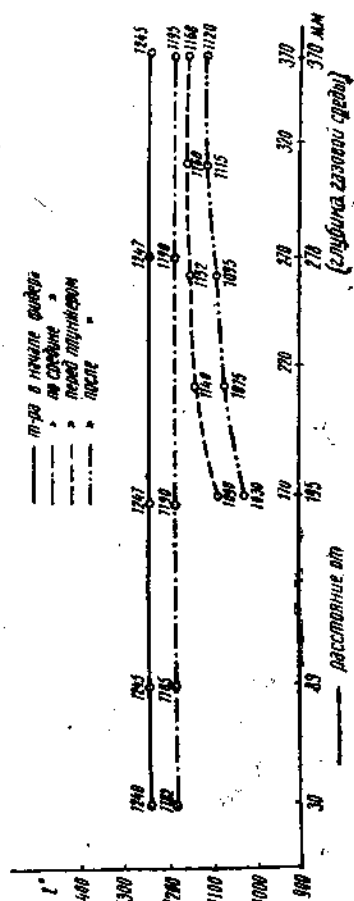


Рис. 5. Распределение температур газовой среды в фидере „Миллер“.

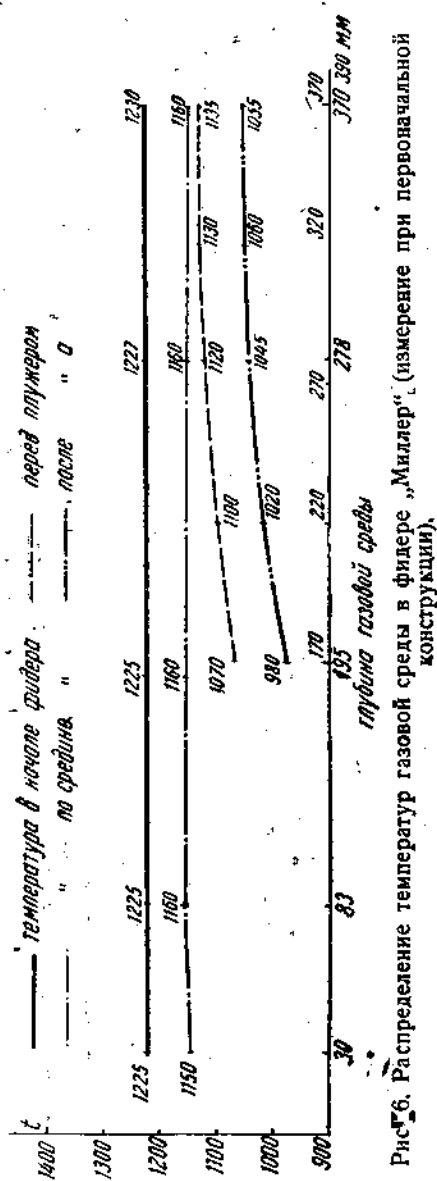


Рис. 6. Распределение температур газовой среды в фидере „Миллер“ (измерение при первоначальной конструкции).

Вертикаль № 3

1-я точка (верхняя)	1070°
2-я "	1100°
3-я " (средняя)	1120°
4-я "	1130°
5-я " (нижняя)	1135°

Вертикаль № 4

1-я точка	980°
2-я "	1020°
3-я "	1045°
4-я "	1050°
5-я "	1155°

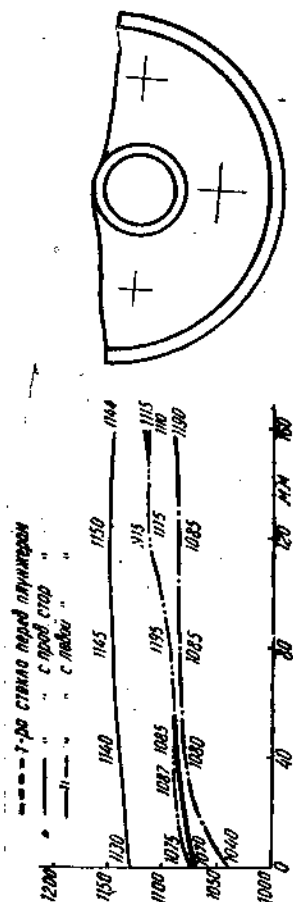


Рис. 7. Изменение температур стекломассы фидера „Миллер“ по глубине.

В вертикалях № 3 и 4 наблюдается уже совсем иная закономерность в изменении температур, чем в вертикалях № 1 и 2. Температурный перепад здесь составляет:

Вертикаль № 3

Между точками 1-й и 2-й $6^{\circ}/\text{см}$ газовой среды

"	"	2-й	"	3-й	4°	"	"	"	"
"	"	3-й	"	4-й	2°	"	"	"	"
"	"	4-й	"	5-й	1°	"	"	"	"

Вертикаль № 4

Между точками 1-й и 2-й $8^{\circ}/\text{см}$ газовой среды

"	"	2-й	"	3-й	5°	"	"	"	"
"	"	3-й	"	4-й	1°	"	"	"	"
"	"	4-й	"	5-й	1°	"	"	"	"

Распределение температуры по длине фидера на расстоянии 20 мм от уровня стекла характеризуется следующим образом:

1-я точка на расстоянии	30 мм от свода ванной печи	—	1230°
2-я	"	"	1160°
3-я	"	"	1135°
4-я	"	"	1055°

Таким образом удельное падение температуры вдоль фидера будет:

между 1-й и 2-й:

$$\frac{1230 - 1160}{27} \cong 2,6^{\circ}/\text{см} \text{ газовой среды;}$$

между 2-й и 3-й:

$$\frac{1160 - 1135}{24,5} \cong 1,0^{\circ}/\text{см} \text{ газовой среды;}$$

между 3-й и 4-й:

$$\frac{1135 - 1055}{12} = \frac{80}{12} \cong 6,7^{\circ}/\text{см} \text{ газовой среды.}$$

Распределение температур в газовой среде представлено на рис. 5 и 6.

Одновременно с пирометражем газовой среды производился и пирометраж стекломассы возле плунжера и поступающего в фидер стекла.

Измерение температур производилось в пяти горизонтальных плоскостях. Результаты измерения приведены на рис. 7 и 8.

Температура поступающего стекла оказалась такой же, как и при изучении фидера Прехта. По распределению температур как газовой среды, так и стекломассы видно, что температура со всех сторон плунжера не одинакова. Разница эта оказывается очень большой. Например температура газовой среды на расстоянии 20 мм от уровня стекла перед плунжером — 1135° (со сто-

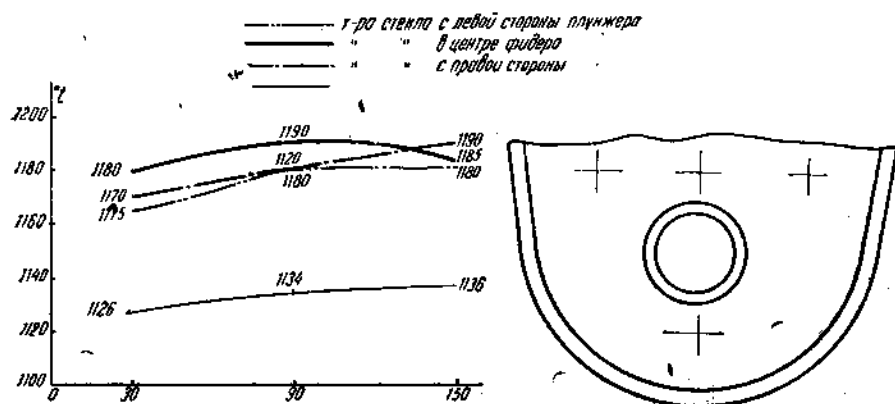


Рис. 8. Изменение температур стекломассы в фидере „Миллер“ по глубине

роны ванной печи), а после плунжера — 1055° , т. е. разница составляет 80° . В стекломассе верхний слой перед плунжером — 1130° и после плунжера — 1040° ; перепад получается в 90° . На глубине 160 мм перед плунжером — 1144° , а после плунжера — 1090° . Здесь разница уменьшается и равняется всего 54° . Такая большая неравномерность температур объясняется следующим:

1) большой теплоотдачей в окружающую среду, т. е. плохой изоляцией; так температура поверхности фидера колеблется в различных местах от 120 до 400° , и в особенности плохо изолированы носовые части, где слой изоляции всего толщиной в 50 мм;

2) наличием в чаше, в области действия плунжера, отверстия, через которое излучается большое количество тепла в окружающую среду;

3) малым пространством между плунжером и торцевой частью чаши (всего 33 мм), что способствует застою стекла там и охлаждению его;

4) плохим обогревом носовой части фидера; даже при высокой температуре в рабочей части (1270 — 1280°) температура капли не превышала 1100 — 1115° C; температура газовой среды фидера колебалась между 1140 — 1160° ;

5) отсутствием самостоятельной отопительной системы, могущей стабилизировать тепловой режим фидера.

Форма капли получалась неправильная (рис. 1), неодинаковой вязкости. Колебания в весе капли доходили до 20—25% от нормального среднего веса стакана в 175 г.

Неравномерность температуры капли сильно отражается на нормальной работе пресса и на качестве выпускаемой продукции. Ножницы от холодной капли быстро перестают резать, работая примерно 1 и в самом лучшем случае 1,5 суток. Формы быстрее и сильнее изнашиваются. Кроме того образуется перекосящий механизм из-за неравномерности распределения стекла в форме, вследствие чего получается разнотолщинность стенок

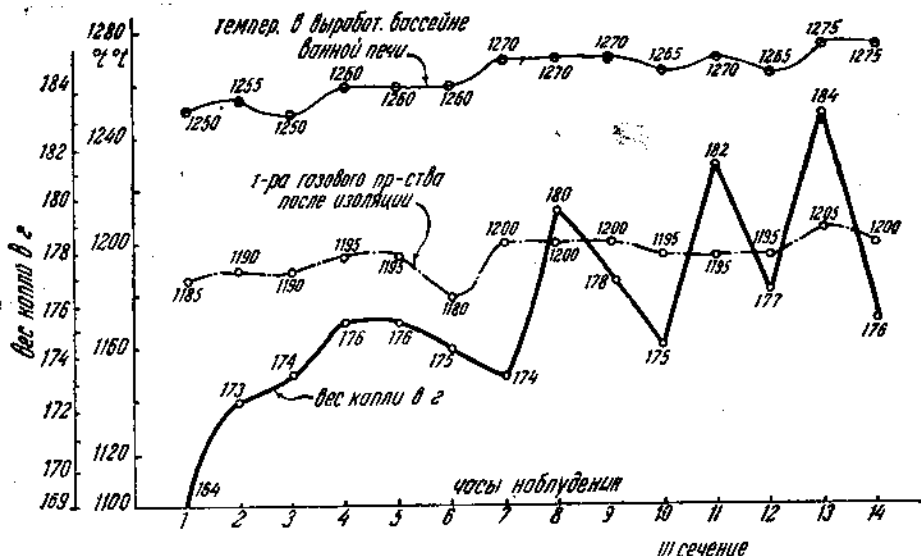


Рис. 9. Изменение температур газового пространства печи и в фидере.

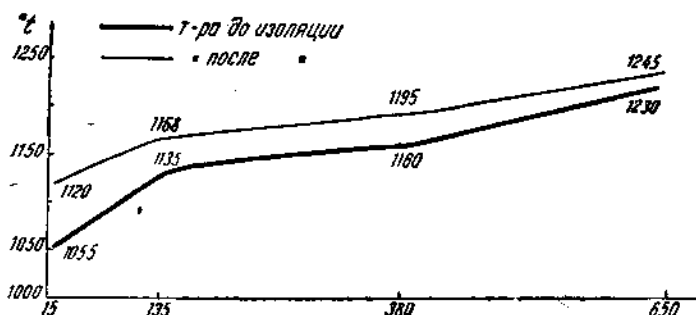


Рис. 10. Распределение температур в газовой среде фидера „Миллер“ по длине.

стаканов и становится весьма затруднительным получить нормальный вес стакана, т. е. 175 г.

В результате обследования фидера в заводских условиях, при первоначальной конструкции его было предложено сделать дополнительную изоляцию верхнего перекрытия фидера, изоляцию плит (состава 65% глины и 35% опилок) и носовой его части, для чего было необходимо приварить к кожуху дополнительный лист и засыпать диатомовой землей толщиной 110 мм, а верхнюю часть обложить трепельным кирпичом, что и было сделано заводом. В результате этой дополнительной изоляции удалось поднять температуру газовой среды фидера с 1140—1160 до 1180—1200° при той же температуре газовой среды выработочной части — 1245—1275° С (рис. 9 и 10).

Температура поверхности фидера при этом сильно понизилась (рис. 11).

Температура стекла также поднялась (рис. 7 и 8), а перепад между наблюдаемыми точками уменьшился.

Температура капли достигла $1120-1140^{\circ}\text{C}$, а форма ее стала более правильной.

В результате предложенного мероприятия удалось удлинить срок службы лезвий ножниц с 1—1,5 суток до 3—5 суток, болвана — до 5 суток. Срок службы формы также увеличился. Вес капли стал более нормальным и стало возможным получать стаканы с меньшим весом. При этом производительность машины увеличилась в среднем с 10—13 тыс. до 20 тыс. шт. в сутки. Однако это мероприятие все же полностью не создает условия наиболее рациональной работы фидера, ибо последний все же еще в большой степени зависит от режима, ванной печи. Достаточно только снизить температуру в рабочей части до $1220-1240^{\circ}$, чтобы и температура фидера упала до $1140-1160^{\circ}$. Вес капли начинает уменьшаться и доходит до 100 г и даже меньше, если своевременно не поднять плунжер из первоначально установленного положения. Поэтому на основе анализа данных было предложено устроить сброс форсунку для самостоятельного отопления фидера, что создало возможность лучшего обогрева чаши фидера и тем самым получения надлежащей температуры капли, работая вместе с тем при более низких температурах в выработочной части печи ($1240-1225^{\circ}$). Кроме того в настоящей конструкции бутылки отсутствовало всасывание плунжером оставшегося стекла от капли (при обратном ходе), что обуславливалось слишком большим отверстием во втулке. Последняя была переделана, что и дало значительно более благоприятный результат.

На рис. 11 а, б, в и г приведены отдельные поверхности фидера Миллера и распределение температур на них до и после изоляции; на рис. 12 — изменения давлений в фидере Миллера.

На основании произведенного обследования и наблюдения за работой фидера Миллера можно сделать следующие выводы:

1. Рекомендовать фидер Миллера для механизированной стекольной промышленности в том виде, в каком он построен на Опытном стекольном заводе, — нельзя по вышеуказанным причинам и в особенности к печам с поперечным пламенем.

2. В дальнейшем при конструировании фидеров неизбежно соблюдать следующие условия:

а) делать приемное отверстие фидера с большим уклоном в сторону ванной печи;

б) снабжать кожух фидера хорошей изоляцией с таким расчетом, чтобы температура поверхности его не превышала $60-90^{\circ}\text{C}$.

в) температуру в газовой среде фидера держать на уровне $1200-1220^{\circ}$ при температуре стекла возле плунжера в $1150-1180^{\circ}$;

г) иметь пространство между плунжером и стенкой фидера не менее 70—110 мм.

3. Держать температуру в рабочей части ванны в $1250-1270^{\circ}$.

4. Устраивать специальное отопление фидера.

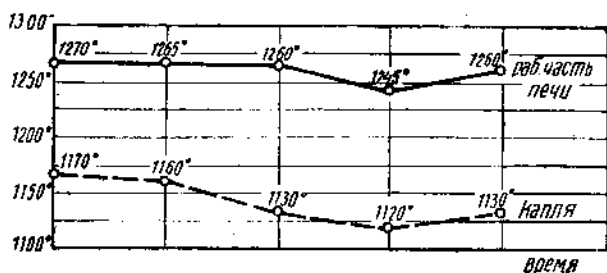
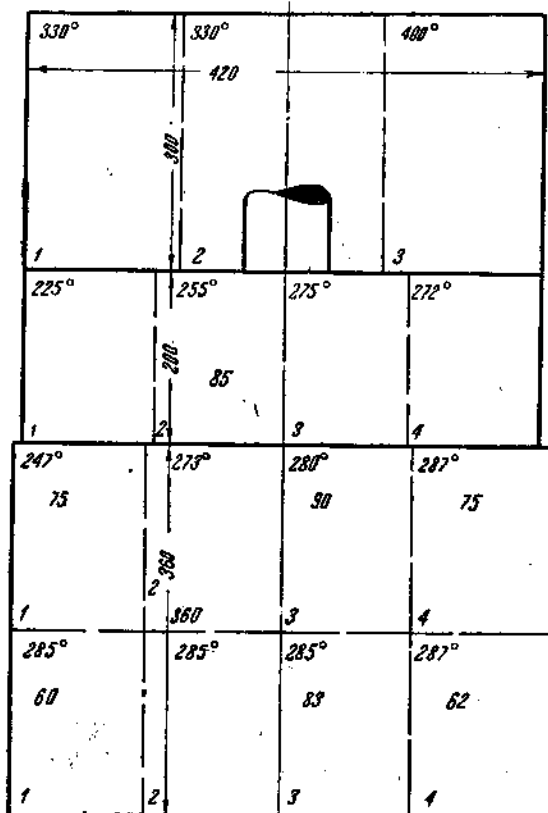


Рис. 11. Изменение температур в рабочей части печи и капли при фидере „Миллера“.



Площадь поверхностей

Правая сторона $S_1 = 0,6549 \text{ м}^2$

Левая " $S_2 = 0,6549 \text{ м}^2$

Вид спереди $S_3 = 0,18 \text{ м}^2$

• сверху $S_4 = 0,336 \text{ м}^2$

• снизу $S_5 = 0,386 \text{ м}^2$

$S_{\text{общая}} = 2,218 \text{ м}^2$

Рис. 11а. Распределение температур по поверхности фидера Миллера.

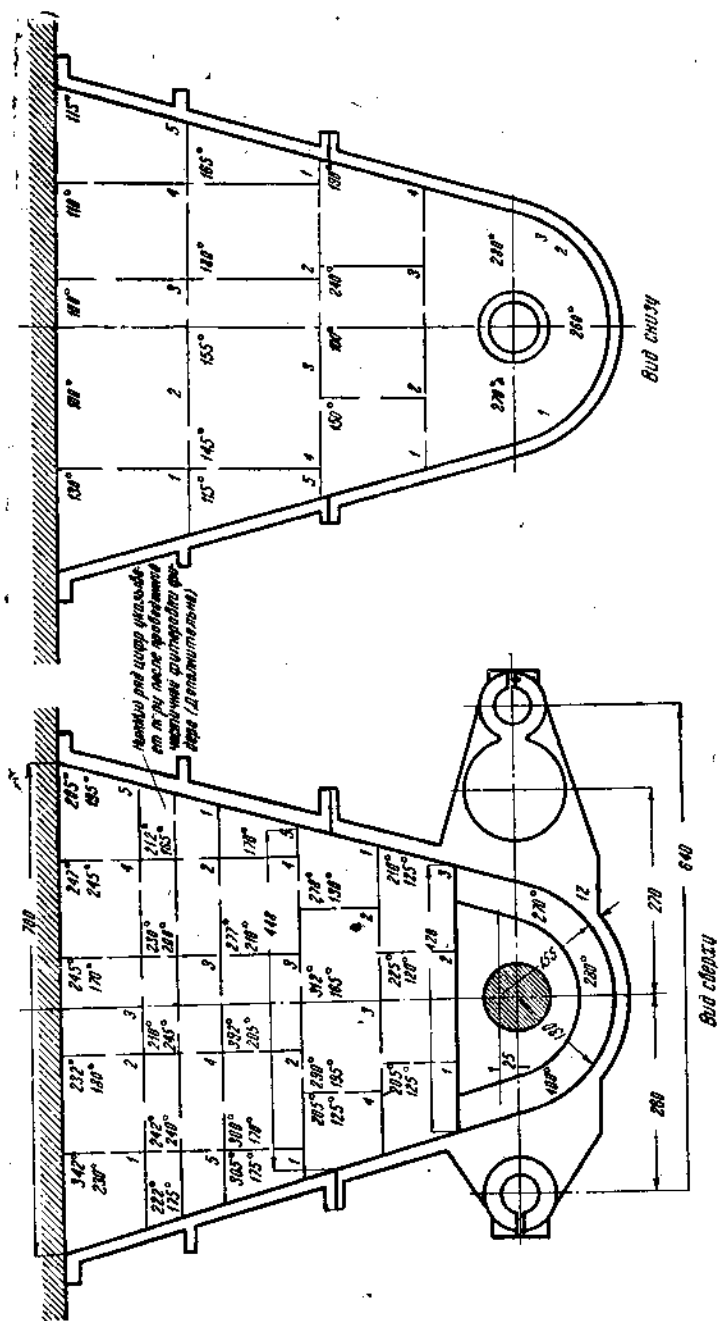


Рис. 116. Распределение температур по поверхности филера Миллера.

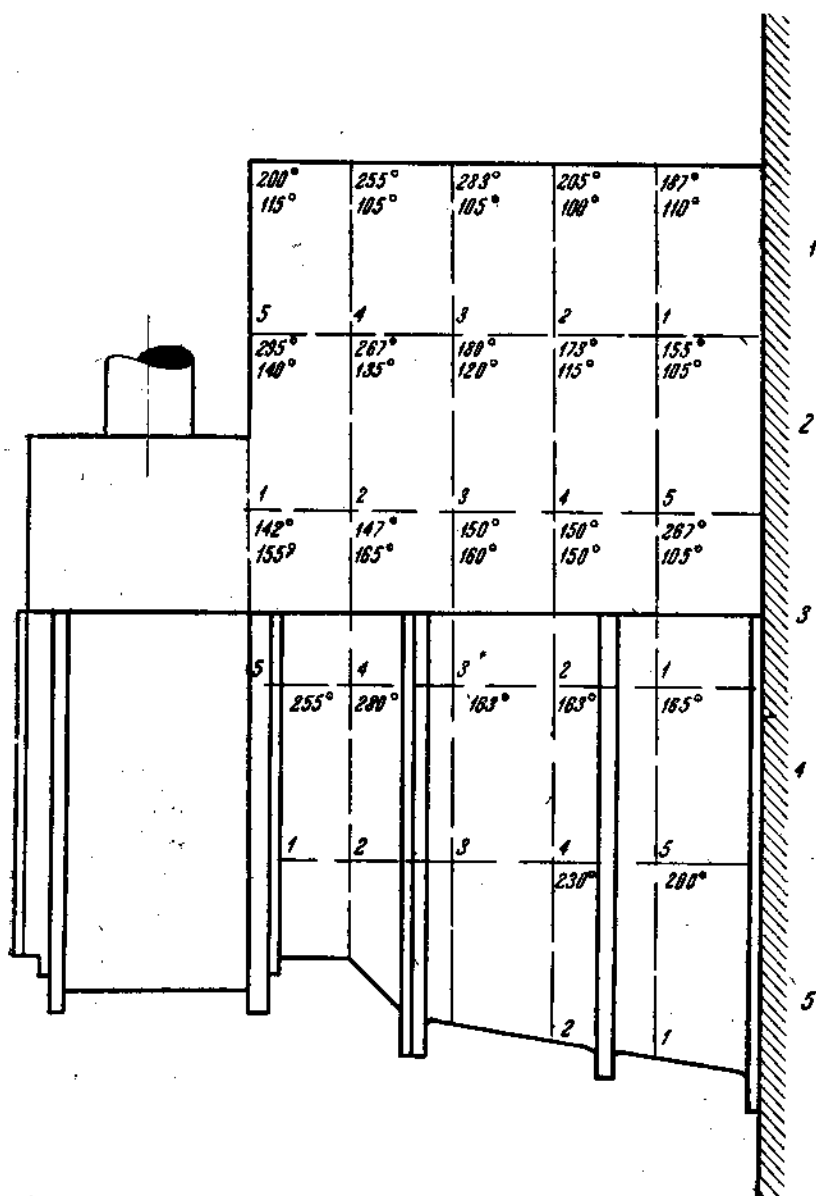


Рис. 11в. Распределение температур по поверхности фидера Миллера.

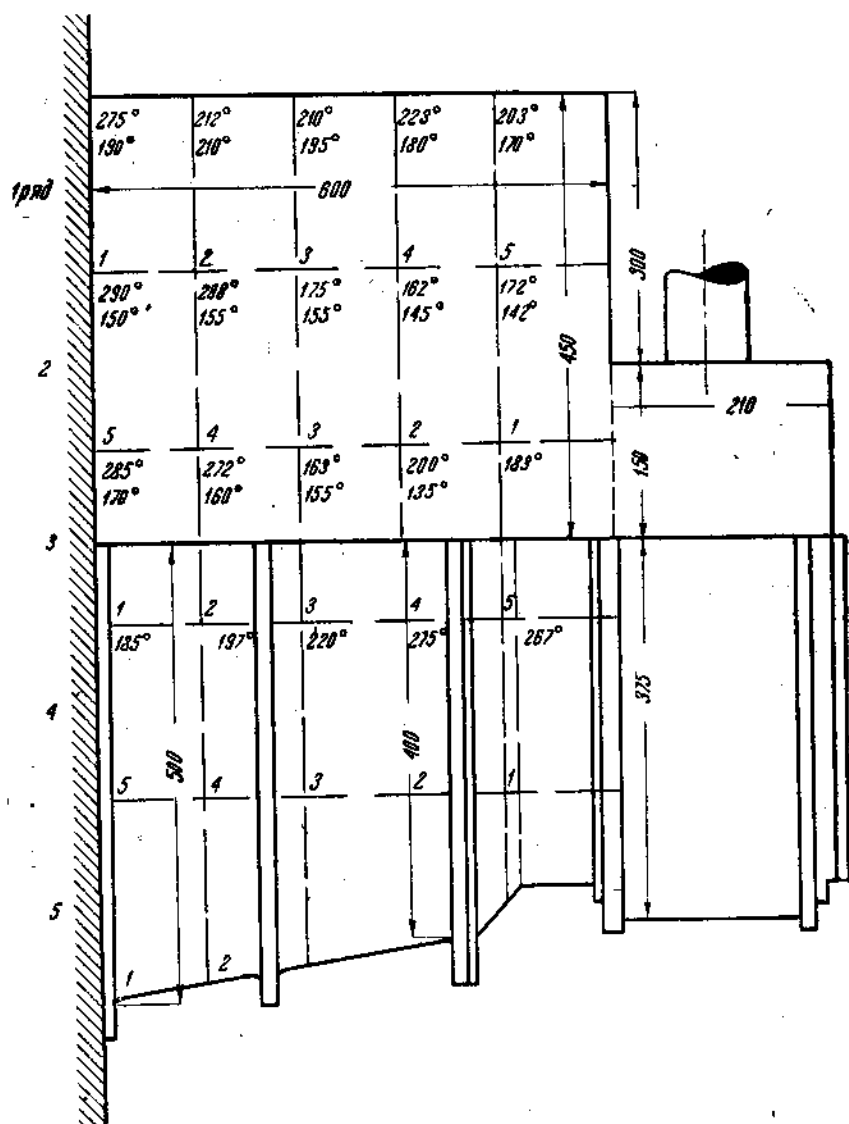


Рис. 11г. Распределение температур по поверхности фидера Миллера.

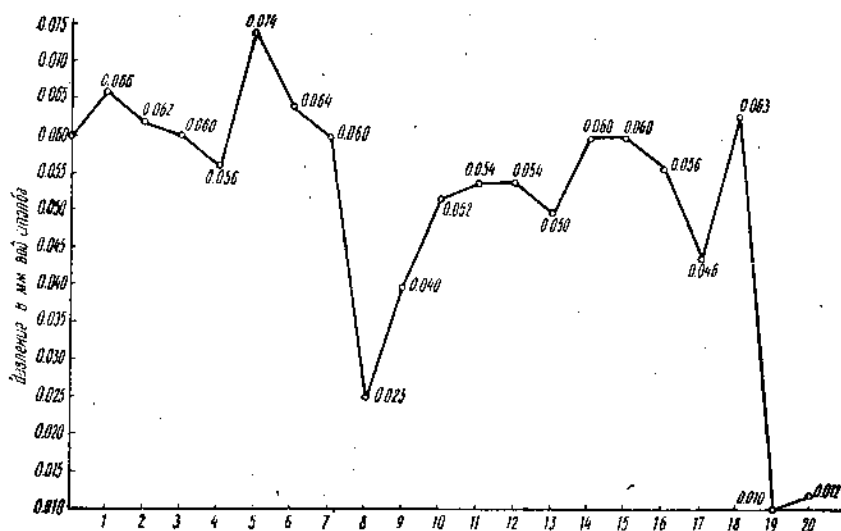


Рис. 12. Изменение давлений в фидере системы „Миллер“.

5. Принять нормальную температуру капли для стаканного пресса Миллера в $1125\text{--}1145^\circ\text{C}$.

6. Длину фидера для лучшего его обслуживания иметь от 1 200 до 1 500 мм.

7. Уровень стекла в фидере не делать больше 150 мм.

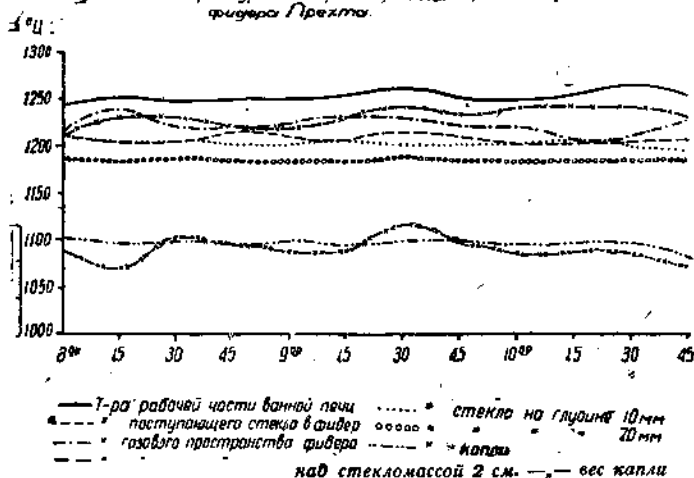
IV. Изучение фидера Прехта (метод и результаты)

Обследование фидера Прехта на ОСЗ производилось в целях установления зависимости работы фидера от режима ванной печи и выяснения конструктивных особенностей фидера, влияющих на получение нормальной стабильной капли.

В результате наблюдений за стабильностью режима выявилось следующее: ванная печь в начале обследования работала неудовлетворительно, температурный режим характеризовался сильными колебаниями температур и временами эти колебания доходили до $\pm 60^\circ\text{C}$, что несомненно отражалось на нормальной работе фидера.

В дальнейшем ванная печь работала с установившимся режимом: максимальные колебания температур в рабочей части бассейна достигали 30° в очень редких случаях, нормальная температура рабочего пространства печи равнялась $1240\text{--}1260^\circ$ (рис. 13, 14, 15). Благодаря этому температура стекломассы, поступающей в фидер, была также постоянна и в среднем равна 1232° ; максимальные колебания ее были $1220\text{--}1235^\circ$. При этом наблюдалось понижение температуры стекломассы, поступающей в фидер, несмотря на повышение температуры газовой среды, что следует объяснить наличием глубинных, инертных потоков, не могущих

Температурная характеристика режима,
фигуры Прейса.



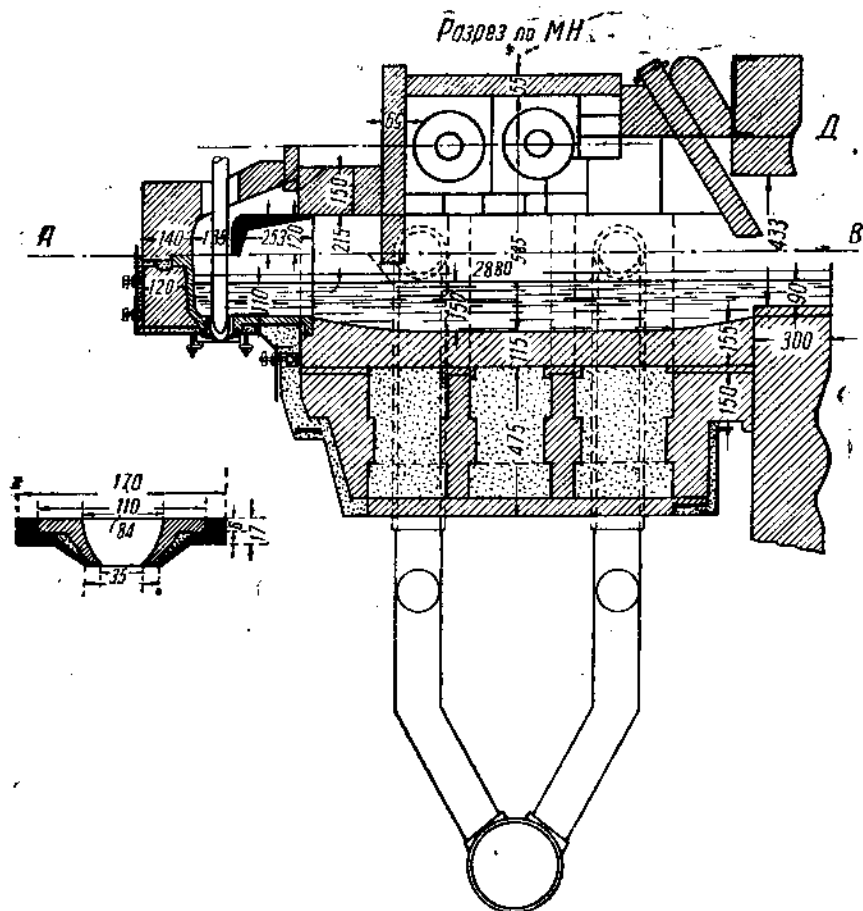


Рис. 16. Конструкция фидера Прехта.

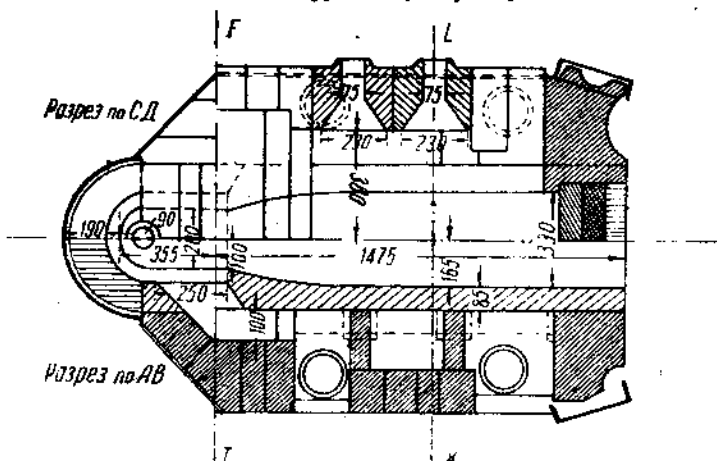
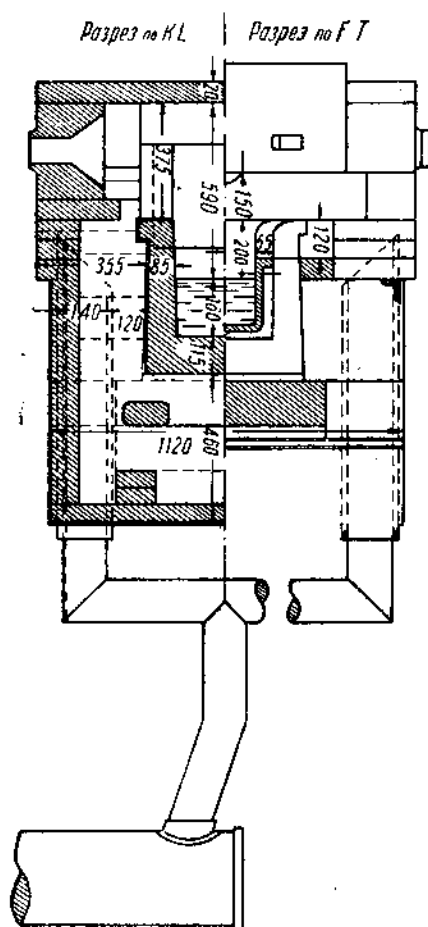


Рис. 17. Конструкция фидера Прехта.

сразу подогреться сверху и охлаждающихся за счет потери тепла через стенку и дно фидера. Во всяком случае температура стекломассы характеризовалась более постоянной температурной кривой, чем газовая среда, вследствие инертности первой (рис. 13). В результате наблюдений за гидравлической характеристикой газов обнаружилось, что в рабочей части имеющееся разрежение колебалось в пределах 0,018 мм водяного столба (от +0,014 до -0,004).

Отсюда видно, что и в отношении тягового режима печь работала при исследовании нормально, преимущественно с небольшим положительным давлением. Газовый анализ в рабочей части печи перед фидером дал средние результаты (в процентах):

CO ₂	O ₂	CO
14,2	1,4	0,3



что указывает на весьма удовлетворительно проходящий процесс горения нефти.

Колебания в составе газа очень незначительны. В самом фидере наблюдения охватывали изучение газовой среды, ее температуры, тяги и состава, а также изучение распределения температур по длине и глубине стекломассы в фидере. Как уже сказано выше, в фидер поступает стекломасса из выработочной части печи с температурой 1220—1235° С. Здесь она идет по шамотному жолобу фидера, обогреваемому боковыми форсунками.

Длина фидера 1708 мм. Слой стекломассы в начале жолоба—90 мм, посередине—160 мм и в чаше—110 мм. Конструкция фидера представлена на рис. 16, 17 и 18.

Температура газовой среды измерялась в двух точках: 1-я точка—на расстоянии 120 мм от стенки ванной печи, 2-я точка—перед плунжером—на расстоянии 5 см от него и 5 см над поверхностью стекла. Температура в фидере регулировалась форсунками и поддерживалась в интервале от 1180° до 1220° для первой точки и от 1160 до 1180°— для второй.

Рис. 18. Конструкция фидера Прехта.

Первый этап изучения носил характер предварительного

обследования как самого фидера, так и выработочной части печи и обнаружил с достаточной достоверностью, что несмотря на стабильный температурный режим в печи (колебания температур не превышали $\pm 20-25^\circ$) вес капли менялся в значительных пределах, достигавших в сторону увеличения 100—150% веса и в сторону уменьшения — 40%. Причины этих колебаний были отнесены к методу и условиям обогрева носовой части фидера, которая в дальнейшем, подвергшись детальному изучению, позволила уточнить вопрос о причинах весовых колебаний и в значительной мере их устранить.

В пользу указанного предположения говорило наличие значительного подсоса холодного воздуха в носовой части, что обнаруживалось анализом газа в той зоне фидера (присутствие кислорода от 13 до 16%). Получающееся при этом охлаждение уменьшало вес капли, а при установлении положительного давления (посредством соответствующей регулировки форсунки и шибера у отсасывающего дымохода) носовая часть нагревалась, температура стекломассы поднималась и вес капли увеличивался.

Однако удержание положительного давления при данной кон-

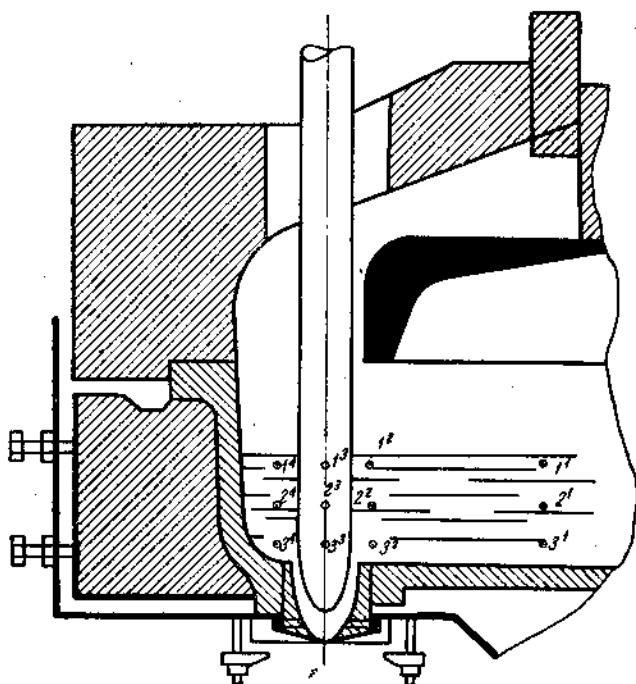


Рис. 19. Расположение точек измерения в стекломассе.

струкции фидера являлось делом не легким, ибо расположение отсасывающего канала обуславливало интенсивный подсос воздуха над стекломассой у плунжера, что при слабости обогревательной форсунки не позволяло иметь устойчивое положительное давление и следовательно приводило к отсутствию подсоса па-

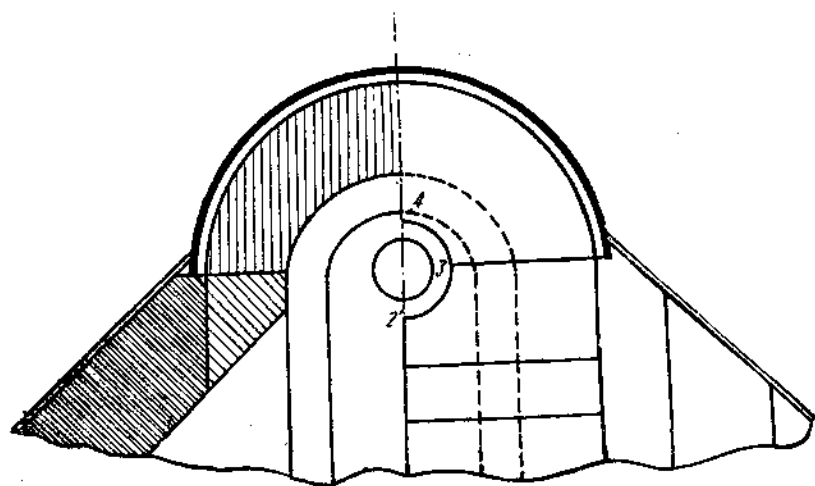


Рис. 20. Расположение точек измерения в стекломассе.

разитного воздуха; малейшее отрицательное давление в печи (разрежение) вызывало нежелательный эффект.

Температурное изучение в этом периоде заключалось в постоянной фиксации температур в системе точек, характеризующих распределение температуры в стекломассе, а также в газовом пространстве фидера, с целью улавливать влияние каждого отдельного фактора при работе фидера на состояние стекломассы, попадающей под плунжер. Расположение точек измерения в стекломассе представлено на рис. 19 и 20.

Температура стекла в чаше измерялась в трех горизонтальных плоскостях по три точки в каждой и по трем вертикалям — спереди, сбоку и сзади плунжера (рис. 19 и 20). I горизонт находится на глубине 10 мм от поверхности стекла, II — на глубине 60 мм и III — на глубине 90 мм. Температура по вертикалям распределялась следующим образом:

Вертикаль № 2 до плунжера (от печи):

1-я точка (верхняя) 1180°

2-я " (средняя) 1185°

3-я " (нижняя) 1184°

Изменение температуры по вертикалям носило характер «отрицательного падения», т. е. неравномерного возрастания.

Между 1-й и 2-й:

$$\frac{1185 - 1180}{50} = 1^\circ/\text{см} \text{ глубины стекломассы.}$$

Между 2-й и 3-й:

$$\frac{1185 - 1184}{30} = 0,033^\circ/\text{см.}$$

Здесь наблюдалось небольшое падение, что позволяло говорить о стабилизации температур на этой толщине.

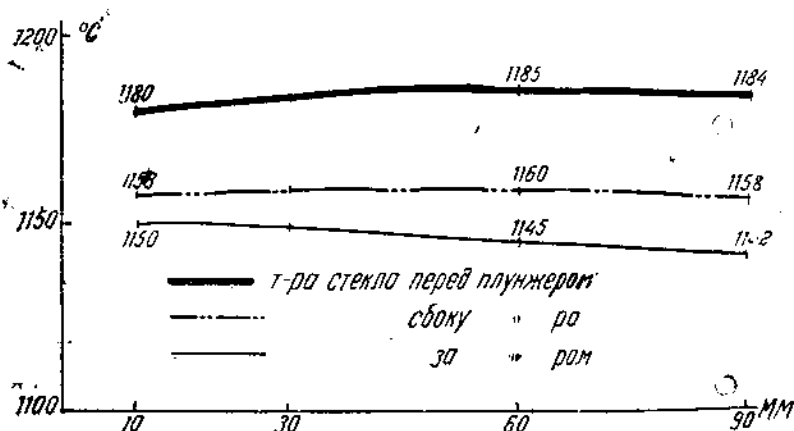


Рис. 21. Распределение температур в глубине стекломассы при первоначальном режиме.

Вертикаль № 3 сбоку плунжера

1-я точка 1158°

2-я " 1160°

3-я " 1158°

Возрастание температур между 1³ и 2³:

$$\frac{1160 - 1158^\circ}{50} = 0,4^\circ/\text{см.}$$

Между 2³ и 3³ небольшое падение:

$$\frac{1160 - 1158^\circ}{30} = 0,66^\circ/\text{см.}$$

Вертикаль № 4 за плунжером имела уже иную закономерность, равномерное падение: температура падала от верхнего слоя к нижнему следующим образом:

верхний слой—1150°

средний " —1145°

нижний " —1142°

т. е. здесь температурный перепад составлял 1°/см.

В горизонтальных плоскостях падение температур очень большое, например точки 3² и 3⁴, до и после плунжера, расположенные на глубине 90 мм, имели перепад 42°.

Таким образом ясно, что состояние отдельных потоков и зон стекломассы, окружающей плунжер, являлось различным, что обуславливало и своеобразие в формировании капли, зависящее прежде всего от вязкости стекломассы, точнее температуры ее. Поток за плунжером наиболее холоден, вот тут-то и охлаждается стекломасса подсосанным воздухом, что частично отражается на температурах наружных (верхних) горизонтов стекломассы сбоку плунжера и перед ним; это искривление изотерм мешает правильному каплеобразованию, а при «чуткости» верхних слоев, движущих стекломассу к нагреву от газовой среды, возникает

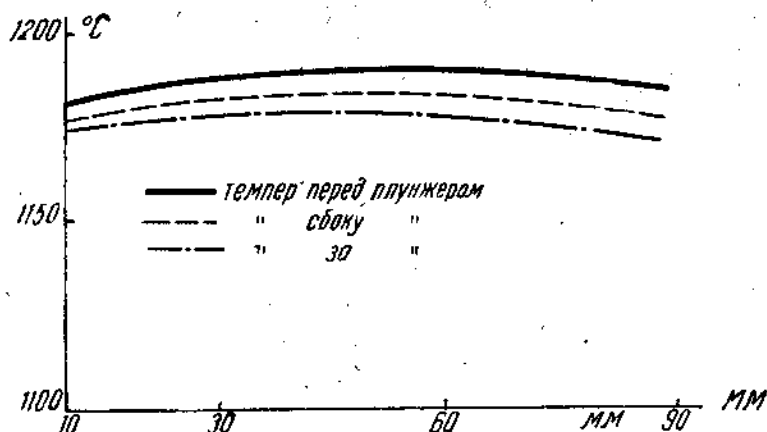


Рис. 22. Распределение температур по глубине стекломассы с применением дополнительного нагрева.

и различие в скоростях перемещения стекломассы, ее вязкости, что и может дать резкие колебания в весе капли (рис. 21).

Второй этап изучения фидера заключался в изменении гидродинамики газовой среды, с учетом вредного влияния разрежения в носовой части. Это было достигнуто путем установления положительного давления в самом фидере, соответственной регулировкой работы горелок, а также изменением пути печных газов, проходящих через самый фидер. Одновременно с этим изменилась и температурная кривая стекломассы. Если в течение первого этапа эта кривая являлась извилистой — вступающая в фидер стекломасса сперва нагревалась, а затем охлаждалась, достигая прежнего уровня, то теперь изменение температуры стало плавным и монотонным. При этом и вес капли перестал резко колебаться, наблюдаемые изменения не превышали 15—20% необходимого веса и его можно было сравнительно легко отрегулировать. Результаты измерения приведены на рис. 22.

Форма капли получается более правильная (симметричная), с одинаковой вязкостью стекла. Произведенные у плунжера анализы газа дали весьма небольшое содержание кислорода: то же, что и в ванной печи (всего лишь в среднем 1,6%); это уже показывает, что присоса воздуха, охлаждающего стекломассу в фидере, в данном случае нет.

Средние результаты газового анализа по фидеру (в процентах):

CO ₂	O ₂	CO
14,2	1,6	0,2

Эти же цифры иллюстрируют достаточно совершенную работу форсунки. Тяговый режим фидера был постоянен, характеризуясь небольшим положительным давлением, в среднем равным +0,03 мм водяного столба, что уже гарантирует отсутствие присоса воздуха. Кроме носовой части разрежение измерялось еще и в трубе, отводящей дымовые газы. Здесь оно колебалось, в

зависимости от степени открытия шибера, в довольно больших пределах — от 5 до 15 мм водяного столба.

Температура стекломассы в фидере измерялась по длине его и по глубине стекломассы. Расположение точек видно на рис. 7 и 8.

Вертикаль 1-я (рис. № 19 и 20) находится на 300 мм перед плунжером и имеет три термопары с водяным охлаждением, расположенные на глубине 15, 60 и 90 мм от зеркала стекломассы.

Вертикали 2-я, 3-я и 4-я лежат спереди, сбоку и сзади плунжера на расстоянии 30 мм от него и тоже имеют по три термопары на глубине 10, 60 и 90 мм. Стекломаcса, входящая в фидер с температурой 1220—1240° С, по вертикали № 1, при средней температуре газовой среды фидера в 1195—1210° имеет следующее распределение температур по глубине: термопара верхнего слоя на глубине 10 мм показывает примерно температуру газовой среды, т. е. 1195—1210° С; следующая термопара на глубине 60 мм дает в среднем уже большую температуру, равную 1220° С, нижняя термопара опять дает понижение в среднем до 1208° С. Удельное изменение температуры в 1-й вертикали по глубине от верхней до средней термопары на расстоянии 60—15=45 мм выражается:

$$\frac{1220 - 1202}{4,5} = 4^\circ/\text{см.}$$

Здесь, как видно, имеем не понижение, а повышение температуры (удельное возрастание), что следует объяснить подходом к плунжеру более горячих глубинных потоков.

По той же вертикали — между средней и нижней термопарой, на расстоянии 90—60=30 мм имеем уже падение температуры, выражающееся той же величиной, т. е. 4°/см:

$$\frac{1220 - 1208}{3} = 4^\circ/\text{см.}$$

Отсюда видно, что благодаря пониженной по сравнению с печью температуре газовой среды фидера верхние слои стекла успевают остыть в среднем на 30°, а средние слои еще не успевают остыть и имеют ту же температуру, что и входящее в фидер стекло; нижний слой стекла благодаря теплопередаче к дну фидера имеет опять пониженную температуру.

Следующая вертикаль № 2 дает такое распределение температуры:

Верхняя точка имеет температуру 1180°, средняя — 1185°, нижняя — 1184°. Распределение температур идет по тому же закону, что и для 1-й вертикали (сначала повышение, потом понижение). Однако здесь перепады очень незначительны; между 1-й и 2-й точками повышение — 1,6° на 1 см глубины стекломассы, а между 2-й и 3-й — понижение — 1,3°/см.

Вертикаль 3-я сбоку плунжера дает то же распределение температур, но здесь температуры значительно ниже, чем по вертикали 2-й. Изменение равно:

$$\begin{array}{l} \text{верхний слой} - 1175^{\circ} \\ \text{средний} \quad \quad - 1182^{\circ} \\ \hline \frac{1182 - 1175}{5,0} = 1,4^{\circ}/\text{см} - \text{подъем;} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{нижний слой} - 1176^{\circ} \\ \hline \frac{1182 - 1176}{3,0} = 2^{\circ}/\text{см} - \text{падение.} \end{array}$$

Вертикаль 4-я за плунжером:

Изменение равно:

$$\begin{array}{l} \text{верхний слой} - 1173^{\circ} \\ \text{средний} \quad \quad - 1176^{\circ} \\ \hline \frac{1176 - 1173}{5,0} = 0,6^{\circ}/\text{см} - \text{повышение;} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{нижний слой} - 1170^{\circ} \\ \hline \frac{1176 - 1170}{3,0} = 2,0^{\circ}/\text{см} - \text{падение.} \end{array}$$

В исследуемом этапе, хотя и с трудом, но все же можно было получить устойчивый вес капли и стабильную температуру ее, причем эта стабилизация была более определенной при введении направляющей перегородки. При этом необходимо отметить, что падение температуры потока стекломассы по горизонтам также резко изменилось: в первом этапе изучения разница температур нижнего горизонта 2-й и 4-й вертикалей достигала 42° , а во втором этапе — только 14° . Рис № 21 и 22.

Выводы

А. В отношении печи ОСЗ

1. Ванная печь ОСЗ при существующей системе отопления может держать температуру газового пространства выработочной части на уровне $1140-1260^{\circ}$, с колебаниями $\pm 20^{\circ}$. При этом существенного и решающего влияния на температуру капли для данного фидера эти отклонения не имеют.

2. Чтобы иметь возможность удерживать стабильный режим в фидере, в выработочной части ванны должно быть небольшое постоянное положительное давление (порядка до 0,01 мм водяного столба), исключающее возможность разрежения в фидере.

3. Температурная кривая стекломассы от выработочной части к фидеру до места отапливаемой части последнего должна быть плавно снижающейся (без перегиба кривой).

Б. В отношении фидера Прехта

4. Для получения капли необходимого веса и консистенции необходимо держать температуру газового пространства отапливаемой части фидера в пределах $1220-1235^{\circ}$, а в носовой (головной) части его — $1180-1190^{\circ}$.

5. Во избежание засоса паразитного воздуха и связанного с этим охлаждения части зеркала стекломассы нужно в фидере держать положительное давление порядка 0,02—0,05 мм водяного столба.

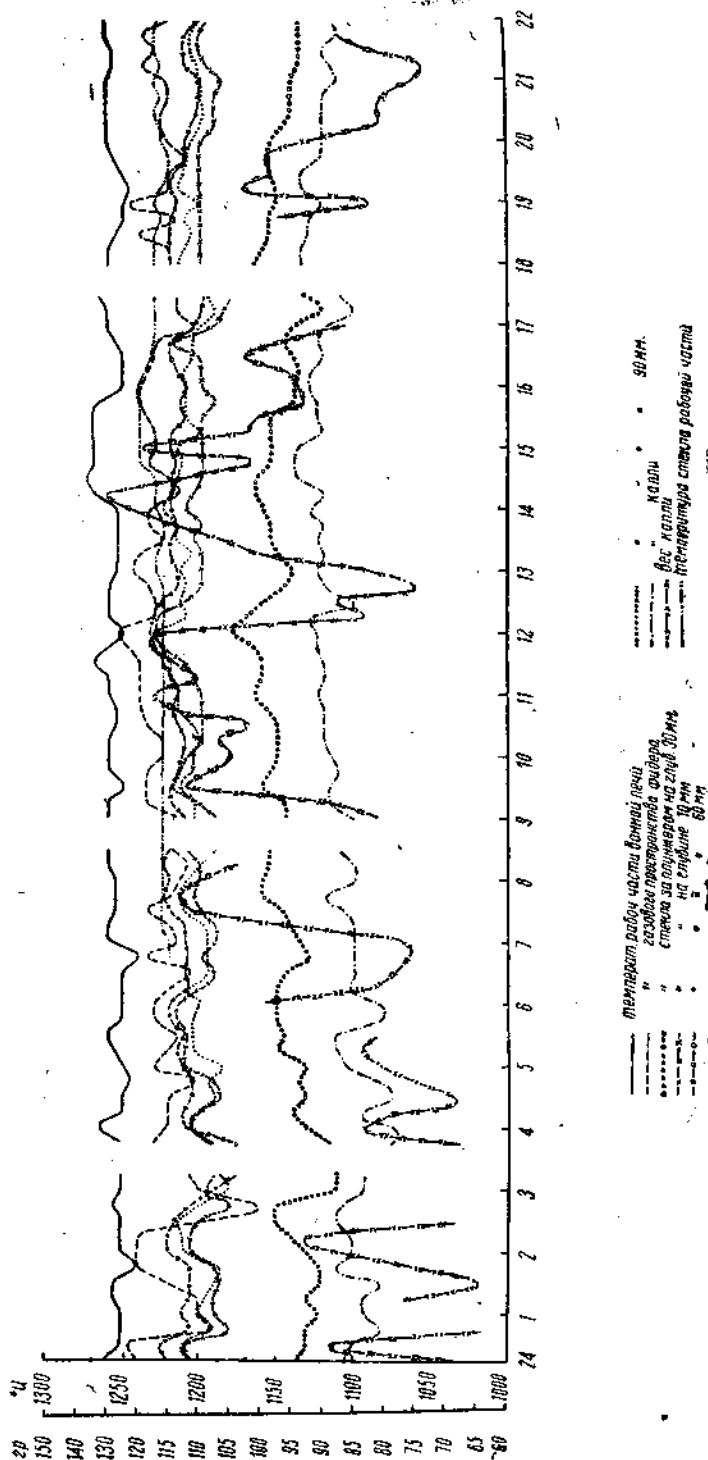


Рис. 23. Температурная характеристика теплового режима ванны и фидера Прехта (1-я серия наблюдений)

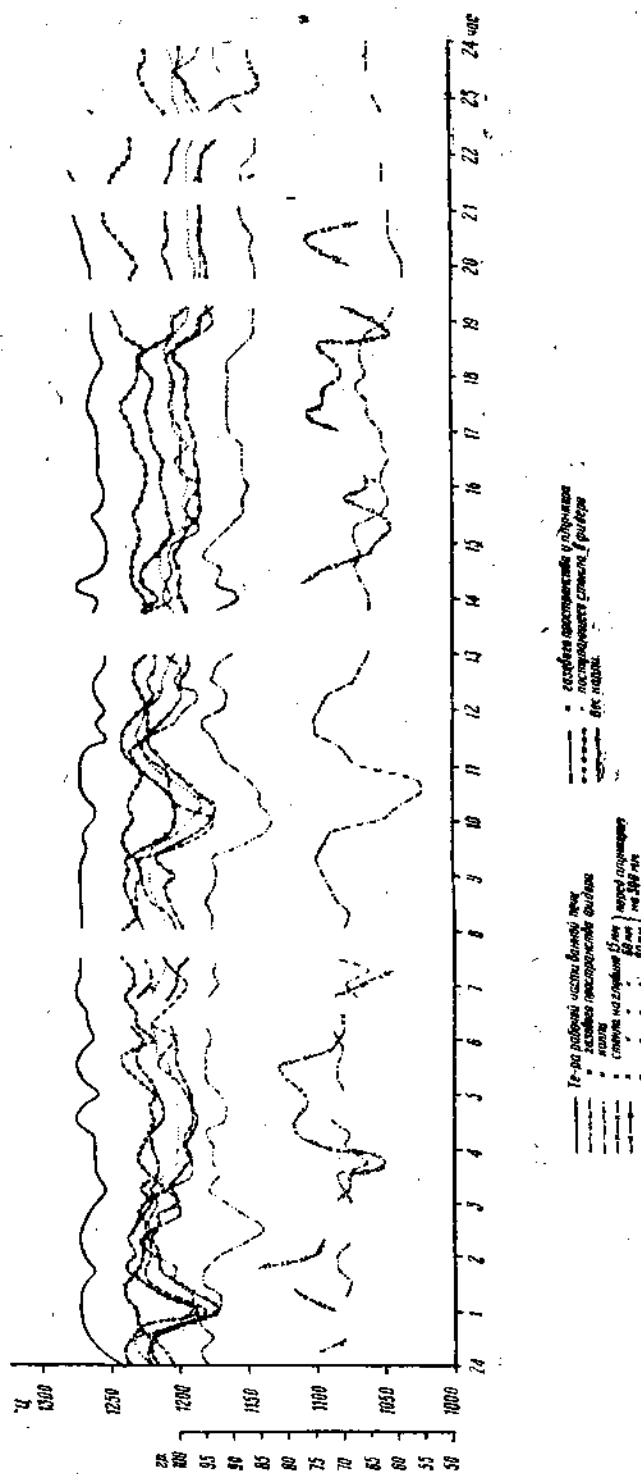


Рис. 24. Температурная характеристика режима ванны и фидера Прехта (2-я серия наблюдения).

6. С этой целью, исходя из существующей конструкции фидера, целесообразно устроить перегородку, вынуждающую печные газы доходить до самой носовой части фидера, обогревая зеркало по всей площади; горизонтальная часть перегородки должна полукольцом охватывать плунжер.

7. В целях сделать режим в фидере более независимым от режима в бассейне, можно применять устройство заградительного шибера, отделяющего газные пространства выработочной части бассейна и фидера.

8. На основе температурного исследования стекломассы по глубине следует признать нерациональным имеющееся углубление в жолобе фидера (наличие порога), правильное будет устроить жолоб наклоненным к печи и поставить лодочку. Наличие углубления обуславливает по временам затяжку плунжером глубоких слоев холодной, вязкой стекломассы.

9. Режим отопления предъявляет жесткие требования к работе форсунок и их расположению; форсунки должны действовать бесперебойно (отсутствие засорения, чистый мазут и т. п.). Представляется целесообразной постановка форсунок в носовой части фидера, имея в виду способ канализации дыма.

10. Измерения температуры поверхности фидера показывают очень пестрые цифры: от 50 до 360°, что дает среднюю температуру по всей наружной площади — 163°. Следует считать необходимым дополнительную изоляцию наиболее нагретых (верхних) частей фидера с целью снижения наружных температур до 70—100° и придания фидеру большей тепловой инерции.

11. При данной конструкции поддерживать устойчивый режим в фидере для получения стабильного веса капли (с допустимыми отклонениями) в течение длительного промежутка времени можно только при весьма тщательном наблюдении за режимом форсунок, при условии введения указанной выше перегородки и при наличии положительного давления и изоляции. Для постоянной эксплуатации в этот фидер желательно ввести намеченные в выводах изменения, которые придадут ему большую температурную инерцию, обуславливающую стабильный вес капли.

Для иллюстрации выводов приведены рис. 23—24.

В них даны температуры газового пространства ванны, фидера и стекломассы, а также веса капли (2 серии наблюдений) позволяющие достаточно полно охарактеризовать влияние теплового режима газового пространства на вес и температуру капли при данной конструкции фидера.

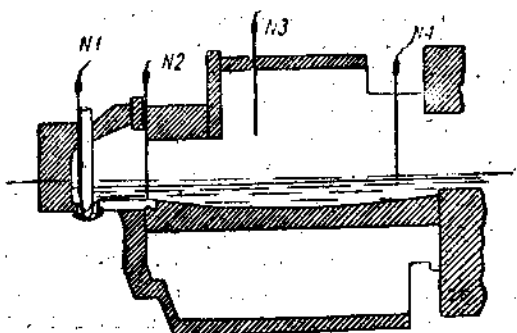


Рис. 23а. Схема расположения точек измерения вдоль фидера.

Оглавление

	Стр.
Введение	5
1. Проф. М. Г. Степаненко Теплотехническая характеристика работы торпедной печи (печь ГЭИС) типа „Торпедо“	14
2. Проф. М. Г. Степаненко и инж. И. О. Томашевич Теплотехническое изучение ванной печи и канала Фурко зеркаль- ного завода	82
3. Проф. М. Г. Степаненко Теплотехническое исследование канала и машин Фурко чехосло- вацкой системы (завода «Великий Октябрь»)	125
4. Проф. М. Г. Степаненко и инж. М. И. Губин Глубинный пирометраж стекловаренных печей	180
5. Проф. М. Г. Степаненко Изучение теплотехнического режима лера «Симплекс»	205
6. Проф. М. Г. Степаненко и инж. М. И. Губин Изучение режима фидеров, питающих автоматы	247

Редактор *И. Подлабухова*

Технич. редактор *Д. Коротаева*

Сдано в набор 10/X 34 г.
Подписано к печати 10/IV-35 г.
Формат бумаги 62×94/16
Колич. печ. л. 17¹/₄ уч. авт. 19,77 л.
Колич. печ. зн. в л. 48 000

Уполномоч. Главлита № В—15561
Индекс с—5
Гизлегпром № 1703
Тираж 1675
Заказ № 2557

Калужская типография Мособлполиграф.