

# Лукомский

Высокотемпературные  
теплоносители и их  
применение

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	2
I. Выбор высокотемпературных теплоносителей . . . . .	3
II. Лабораторные и полупромышленные установки на органическом теплоносителе . . . . .	7
III. Лабораторные установки на неорганическом теплоносителе	12
IV. Бинарные котлы по схеме ЭНИН АН СССР на дифениле и дифенильной смеси . . . . .	14
V. Промышленные технологические установки с обогревом дифенильной смесью . . . . .	23
VI Промышленные технологические установки с масляным обогревом . . . . .	34
VII. Установки с обогревом глицерином . . . . .	37
VIII. Основные данные по применяемым высокотемпературным теплоносителям . . . . .	42

---

## ВВЕДЕНИЕ

Значительное число технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства протекает при высоких температурах.

Интенсивность технологического процесса, а также качество выпускаемого продукта в ряде производств в большой степени зависят от точности поддержания температуры на отдельных стадиях процесса и от абсолютной величины этой температуры.

При проектировании новых и реконструкции старых производств в первую очередь встает вопрос о способах получения нужных температур для осуществления технологических процессов. Наиболее распространенными являются обогрев дымовыми газами, насыщенным водяным паром, водой высокого давления и электричеством.

За последние годы в связи с интенсификацией производства и все возрастающими требованиями в части поддержания постоянства температуры технологического процесса перечисленные выше общепринятые методы обогрева начали заменяться обогревом при помощи высокотемпературных теплоносителей, т. е. промежуточных теплоносителей, которые имеют высокую температуру нагрева при сравнительно низком давлении.

Применение высокотемпературных теплоносителей для обогрева производственных аппаратов имеет значительную давность, однако широкого распространения этот, обладающий целым рядом преимуществ способ обогрева не получил.

В СССР на ряде производств давно применяется обогрев при помощи масла, ртути, расплавленных металлов и т. п. За последние годы большое распространение в качестве теплоносителя получила дифенильная смесь (ВОГ).

Основным препятствием для быстрого и широкого применения в промышленности (и замены такого дефицитного вида энергии, как электрическая) высокотемпературных теплоносителей является отсутствие таких высокотемпературных теплоносителей, которые в полной мере удовлетворяли бы всем возросшим требованиям производства, а также отсутствие выпуска оборудования, термокинетических и эксплуатационных данных по применяемым в промышленности теплоносителям, необходимых для проектирования.

Настоящее информационное письмо имеет целью отразить опыт эксплуатации установок, использующих различные высокотемпературные теплоносители, нашедшие наибольшее распространение на промышленных предприятиях Советского Союза.

---

## I. ВЫБОР ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

К наиболее распространенным и изученным органическим теплоносителям, имеющим перспективы дальнейшего применения, могут быть отнесены следующие органические соединения дифенил, дифениловый эфир (дифенилоксид), дифенильная смесь (эвтектическая смесь 73,5% дифенилового эфира с 26,5% дифенила), нафталин, тетракрезилорексисилан (тетракрезилорексисиликат), глицерин, эвтектическая смесь дифенилового эфира (59,5%), дифенила (25,5%) и нафталина (15%) и различные масла

Данные по физико-химическим свойствам дифенила, дифенилового эфира, дифенильной смеси и нафталина представлены в табл 1 [Л 1-4]

Неорганические теплоносители получили в СССР значительно меньшее распространение, чем органические теплоносители. Вместе с тем в ряде случаев неорганические теплоносители имеют существенные преимущества перед органическими теплоносителями

Наибольшим препятствием к распространению неорганических теплоносителей являются отсутствие в широкой литературе публикации об опыте эксплуатации и недостаточность данных для проектирования

В последние годы в СССР был исследован ряд неорганических теплоносителей расплавленные соли нитритов и нитратов, NaOH и KOH и их смеси и растворы в воде. Кроме того, появились некоторые данные по легкоплавким металлам. Ниже приводятся данные по расплавленным солям нитритов и нитратов, в настоящее время являющиеся наиболее перспективными, по которым проведен ряд исследований в ЭНИН АН СССР, ИОНХ АН СССР и ЦНИИПО МВД СССР

При выборе того или иного теплоносителя для обогрева технологических аппаратов или получения пара обычно исходят из необходимой рабочей температуры и ряда специфических требований, характерных для данного производства, а также из экономической целесообразности, т. е. стоимости теплоносителя

В табл 2 дана сводка основных данных по приведенным выше теплоносителям, могущим, в первую очередь, повлиять на выбор того или иного теплоносителя

Из данных таблицы можно сделать следующие выводы

а) Для рабочих температур ниже 280° С могут применяться масла, глицерин, нафталин и нафталиновые смеси. Из этой группы при прочих равных условиях и отсутствии каких-либо специальных требований (например, естественная циркуляция) следует отдавать предпочтение маслам как наименее дефицитным, наиболее дешевым и нетоксичным. В случае полной противопоказанности горячих теплоносителей могут быть применены тетрахлордифенил, тетракрезилорексисилан и расплавленные соли

Наименование	Размерность	Дифенильная смесь			
		Температура, °С			
		260	300	350	380
Химическая формула . . . . .	—	26,5% (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> + 73,5% (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O			
<i>t</i> <sub>кип</sub> , <i>t</i> <sub>плав</sub> , <i>t</i> <sub>кр</sub> , <i>R</i> <sub>кр</sub> . . . . .	°С, кг/см <sup>2</sup>	258, 12, 528, 41			
Давление . . . . .	кг/м <sup>2</sup>	1,05	2,38	5,31	8,15
Удельный вес жидкости . . . . .	кг/м <sup>3</sup>	863	825	772	739
Удельный вес пара . . . . .	кг/м <sup>3</sup>	3,9	8,7	20	30
Теплота парообразования . . . . .	ккал/кг	68,5	63	56,5	52,5
Теплосодержание пара . . . . .	ккал/кг	191,5	212,5	240,5	257,5
Теплосодержание жидкости . . . . .	ккал/кг	123	149,5	184	205
Истинная теплоемкость . . . . .	ккал/кг	0,63	0,66	0,69	0,71
Динамическая вязкость . . . . .	μ 10 <sup>6</sup> кг/сек/м <sup>2</sup>	28,7	23,2	18,6	16,4
Теплопроводность жидкости . . . . .	ккал/мчас °С	0,088	0,083	0,077	0,073
Поверхностное натяжение . . . . .	σ 10 <sup>4</sup> кг/м <sup>2</sup>	16,2	12,7	9	6,6
Срок работы до 12—15% разложения . . . . .	сутки	—	—	1 500	360
Рекомендованные для аппаратуры материалы . . . . .	—	Мягкое железо, медь, алюминий, асбестометаллические и паранитовые			
Производство . . . . .	—	Составляется из компонентов на месте*			
Внешний вид, запах . . . . .	—	При <i>t</i> = 12°С бесцветная или светлорычная жидкость с сильным запахом			
Горючесть, взрывоопасность, токсичность . . . . .	—	Горюча, взрывобезопасная, не токсична			
Дополнительные сведения . . . . .	—	Не растворяется в воде. Температура вспышки 111—112°С; температура воспламенения 121°С			

При *t* = 370°С. \*\* При *t* = 360°С. \*\*\* При *t* = 250°С.

Таблица 1

Дифенил				Дифенильный эфир				Нафталин			
Температура, °С				Температура, °С				Температура, °С			
260	300	330	360	260	300	340	370	250	300	320	340
$(C_{10}H_8)_2$				$(C_6H_5)_2O$				$C_{10}H_8$			
255,2, 67—70,5, 530, 43				257, 27, 532, 35,2				218, 79			
1,146	2,51	4,2	6,68	1,07	2,32	4,5	6,97	2,02	4,9	6,7	8,93
837	800	770	739	875	831	789	768**	846	812	796	—
3,8	9,1	15,5	24,2	4,5	9,9	20,2	24,0**	5,8	12,9	17	21,8
75,1	67	62,5	68,5	65,7	61	56,6	53,3	75,2	72,5	69,5	—
170,2	189,5	206	218,7	182,2	197,8	226,5	242,7	165,6	197,8	209,1	—
95,1	122,5	143,5	160,1	116,5	142,3	168,9	189,4	90,4	125,3	139,6	—
0,69	0,7	0,7	—	0,63	0,65	0,67	0,69	0,68	0,71	0,72	—
—	—	—	—	58***	—	27,5****	—	22,4****	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	145*	—	Не- сколь- ко лет	300	—	—	—	320	115****
Мягкое железо, медь, алюминий, асбестометаллические и паранитовые				Мягкое железо медь, алюминий, асбестометаллические и паранитовые				Производится в больших количествах на коксобензольных заводах			
Выпускается в СССР в больших количествах нефтяной и коксохимической промышленности				Производится в парфюмерной промышленности				Производится в больших количествах на коксобензольных заводах			
Технический дифенил ГОСТ 4254-48, имеет вид кристаллов желтого цвета при $t=60^\circ C$ , имеет сильный запах при $t=70^\circ C$				При температуре $25^\circ C$ — бесцветные кристаллы с сильным запахом герани				Технический нафталин ГОСТ 1703 47 при $25^\circ C$ — кристаллический с резким запахом			
Горит коптящим пламенем, тушить паром, водой и пеной				Горит коптящим пламенем, тушить следует паром, водой и пеной				Горит коптящим пламенем, в воде не растворяется			
Не токсичен, не растворяется в воде, температура воспламенения $134^\circ C$ , температура вспышки $112^\circ C$				Не токсичен, не растворяется в воде, температура вспышки $112^\circ C$ , температура воспламенения $135^\circ C$				Токсичен			

\*\*\* При  $t = 320^\circ C$  \*\*\*\* При  $t = 180^\circ C$

Наименование теплоносителя	Примерная стоимость, руб
1. Дифенильная смесь . . . . .	35
2 Дифенил . . . . .	25
3 Дифениловый эфир . . . . .	40
4. Нафталин . . . . .	5
5. Нафталиновая смесь . . . . .	—
6. Глицерин . . . . .	10
7. Тетрахлордифенил (совол) . .	15
8. Тетракрезилоксисилан . . . .	10
9. Масла . . . . .	0,76÷1,15
10. Расплавленные соли (РС) . .	1÷3

Таблица 2

Пределная рабочая температура, °С	Температура кипения, °С	Температура застывания, °С	<i>p</i> раб. ата	В паровой или жидкой фазе	Горючесть	Токсичность
380	258	12	8,15	В паровой и жидкой	Горюч	Не токсичен
350—360	255	70	6—7	То же	То же	То же
360—370	258	27	6÷7	" "	" "	" "
320—340	218	80	7÷9	" "	" "	Токсичен
320—340	—	4	—	" "	" "	То же
240	290	—18	1	В жидкой	" "	Не токсичен
300	340	—7	1	То же	Мало горюч	Токсичен
315	435—440	—36	1	" "	То же	Нет сведений
280	250—350	10	1	" "	Горючи	Не токсичны
550	—	144	1	" "	Не горючи	То же

б) Для рабочих температур 280—340°С могут быть рекомендованы нафталин, нафталиновые смеси, дифенил, дифениловый эфир и дифениловая смесь. Причем для более низких из указанных пределов температур следует рекомендовать нафталин и нафталиновые смеси как наиболее дешевые. Так же как и в предыдущем пункте, в случае противопоказанности горячих теплоносителей могут быть применены тетрахлордифенил, тетракрезилосилисан и расплавленные соли.

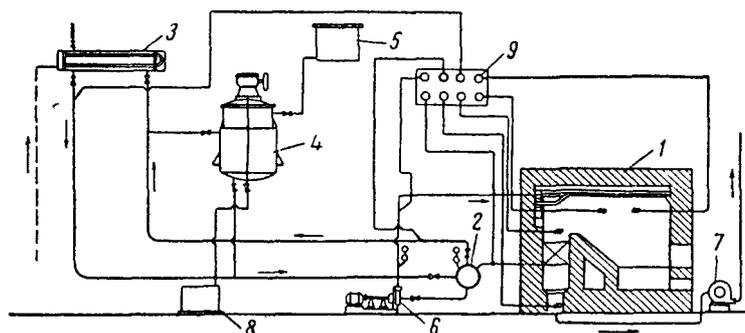
в) Для рабочих температур от 340 до 380°С могут применяться, в первую очередь, дифениловая смесь для естественной циркуляции и расплавленные соли при принудительной циркуляции, а затем дифениловый эфир и дифенил.

г) Для рабочих температур от 380 до 550°С могут быть рекомендованы расплавленные соли РС.

## II. ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ НА ОРГАНИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Государственным экспериментальным институтом химического машиностроения были проведены работы по применению высокотемпературных теплоносителей.

Помимо ряда малых лабораторных установок производительностью



Фиг. 1. Опытная установка, обогреваемая органическими теплоносителями.

1 — испаритель, 2 — сепаратор, 3 — конденсатор, 4 — реакционный аппарат с рубашкой, 5 — бак для сырья, 6 — циркуляционный насос, 7 — дымосос, 8 — бак готового продукта.

до 6 000 ккал/час, была сооружена и пущена полупромышленная установка производительностью 70 000 ккал/час, работавшая на нафталине и дифениловом эфире. Схема установки приведена на фиг. 1. Установка состоит из генератора пара 1 и теплоиспользующих устройств 3 и 4.

Генератор пара представляет собой змеевик из труб диаметром 21/27, расположенных частично в верхней части топочной камеры (радиационная поверхность) и частично в опускном газоходе (конвективная поверхность). Циркуляция теплоносителя принудительная при помощи насоса 6.

Топочная камера в нижней части снабжена ручной колосниковой решеткой.

Высокотемпературный теплоноситель поступает в циркуляционный насос 6, прогоняется через змеевики, расположенные в топочной камере и газоходе, и в виде парожидкостной смеси поступает в сепаратор 2, где пар отделяется от жидкости и поступает в теплообменник 3 и реакционный аппарат 4, а жидкость снова забирается циркуляционным насосом. Пар теплоносителя конденсируется в рубашке реакционного аппарата и теплообменника, и в виде конденсата стекает в сепаратор. Для разогрева теплоносителя при пуске сепаратор обогревается электричеством. Технические характеристики установки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Наименование	Размерность	Величина
Поверхность нагрева генератора пара . . . .	$m^2$	5,77
Поверхность нагрева радиационной части . .	$m^2$	2,47
Поверхность нагрева конвективной части . .	$m^2$	3,3
Поверхность нагрева теплообменника . . . .	$m^2$	0,56
Поверхность нагрева реакционного аппарата	$m^2$	0,36
Максимальная теплопроизводительность установки . . . . .	$ккал/час$	90 000
Количество теплоносителя в установке . . . .	$кг$	75
Объем сепаратора . . . . .	$л$	86
Объем топочного пространства . . . . .	$m^3$	1,2
Площадь колосниковой решетки . . . . .	$m^2$	0,48
Топливо и способ сжигания . . . . .	Факельное, мазут	
Производительность циркуляционного насоса	$m^3/час$	12

Установка проработала около 4 мес., из них испытания велись 170 час.

На основании полученных материалов [Л. 1] А. М. Ластовцевым были сделаны следующие выводы:

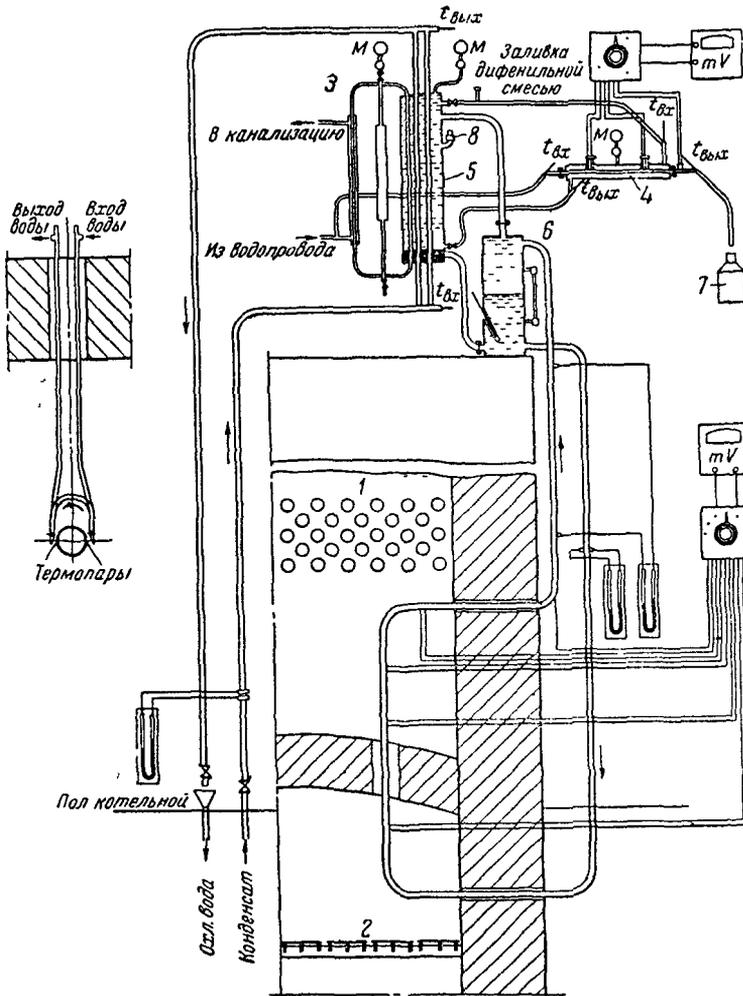
а) Нафталин и дифениловый эфир могут успешно работать в качестве теплоносителей до температуры  $320^{\circ}C$ . При этом — давление насыщенного пара нафталина  $7,2 \text{ ата}$ , а дифенилового эфира составляло всего  $3,8 \text{ ата}$ . Эксплуатация установки не вызывала каких-либо специфических трудностей. При работе с нафталином отличительным являлась необходимость обогрева трубопроводов при пуске установки. После ее пуска обогрев отключался и разницы между работой на дифениловом эфире и нафталине не ощущалось.

б) Показана надежность работы трубчатого паробразователя на дифениловом эфире и нафталине при обогреве открытым пламенем и теплонапряжениях, в среднем доходящих в радиационной части до  $100\,000 \text{ ккал}/m^2 \text{ час}$ . При этом температура на выходе из топочной камеры доходила до  $700^{\circ}C$ .

в) Обычный центробежный однодисковый насос со специальным охлаждаемым длинным сальником удовлетворительно работал при температурах до  $320^{\circ}C$  и давлении до  $7,2 \text{ ата}$ . Особенно хорошо работал насос на нафталине, так как в охлажденном сальнике нафта-

лин закристаллизовывался внутри набивки и создавал хорошее уплотнение. При отключенном охлаждении плотности сальника добиться не удавалось.

г) Обработка экспериментальных материалов показала, что коэффициенты теплоотдачи от конденсирующихся паров дифенилового эфи-



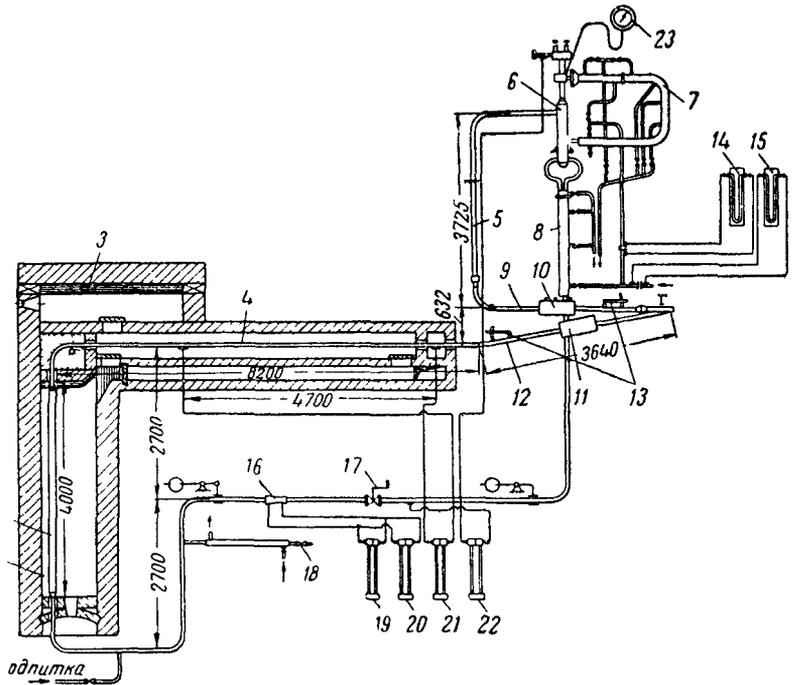
Фиг. 2. Схема полупромышленной бинарной установки высокого давления.

1 — первый пучок котла; 2 — колосниковая решетка; 3 — контур высокого давления; 4 — горизонтальный конденсатор; 5 — конденсатор; 6 — сепаратор; 7 — мерный бак; 8 — предохранительный клапан.

ра и нафталина на горизонтальных трубах близки к подсчитанным по теоретической формуле Нуссельта

$$\alpha_{\text{кон}} = 0,724 \sqrt[4]{\frac{r\gamma^2 3g}{\mu d (t_n - t_{\text{ст}})}}, \quad (1)$$

где  $r$  — скрытая теплота парообразования,  
 $\gamma$  — удельный вес жидкости,  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности жидкости,  
 $d$  — наружный диаметр трубы,  
 $\mu$  — вязкость жидкости;  
 $g$  — ускорение силы тяжести;  
 $t_n$  — температура пара;  
 $t_{\text{ст}}$  — температура стенки трубы.



Фиг. 3. Схема полупромышленного экспериментального стенда для изучения циркуляции и расслоения

— топка, 2 — вертикальная обогреваемая труба, 3 — дополнительная топка, — горизонтальная труба диаметром 56/70 мм, 5 — вертикальная необогреваемая труба, 6 — сепаратор, 7 — конденсатор, 8 — переохладитель, 9 — горизонтальная труба диаметром 40/54 мм 10 и 11 — электронагреватели, 12 — наклонная труба, 13 — приспособление для измерения угла наклона труб, 14 и 15 — дифманометры, 16 — труба Вентури, 17 — дроссельная заслонка, 18 — отбор проб, 19 — 22 — дифманометры, 23 — манометр.

С 1945 г в ЭНИН АН СССР было сооружено несколько лабораторных и полупромышленных установок, работающих на дифенильной смеси для исследования теплообмена при конденсации, температурного режима экранных труб, максимальных тепловых потоков и циркуляционных характеристик. На указанных установках исследования проводились в течение более трех лет.

На фиг. 2 и 3 приведены схемы испытываемых установок

В табл. 4 даны основные конструктивные характеристики установок

Таблица 4

Наименование	Размерность	Установка (фиг. 2)	Установка (фиг. 3)	Лабораторные установки
Поверхность нагрева генератора пара . . . . .	м <sup>2</sup>	0,406	2,4	—
Поверхность нагрева радиационной части . . . . .	м <sup>2</sup>	0,2	0,9	—
Поверхность нагрева теплообменника . . . . .	м <sup>2</sup>	0,352	—	—
Давление теплоносителя (дифенильная смесь) . . . . .	кг/см <sup>2</sup>	1—10,5	1—10,5	1 ат
Максимальная температура теплоносителя . . . . .	°С	400	400	380
Теплопроизводительность установки . . . . .	ккал/час	60 000	200 000	1 000
Максимальное удельное теплонепрежение радиационной поверхности . . . . .	ккал/м <sup>2</sup>	> 350 000	> 250 000	600 000
Диаметр экспериментальной трубы . . . . .	мм	40/50	50/70	15
Длина экспериментальной трубы . . . . .	м	3,2	11	0,1
Материал экспериментальной трубы . . . . .	—	Углеродистая сталь	Хромомolibденовая сталь	Нихром
Количество теплоносителя в установке . . . . .	л	32	—	0,5—1
Объем сепаратора . . . . .	л	17	—	—
Топливо и способ сжигания	—	Уголь на ручной решетке и газ	Факельный мазут	Электрообогрев

Длительная работа упомянутых выше установок позволяет сделать следующие выводы, касающиеся их эксплуатации:

а) Более чем полугодовая эксплуатация контура (фиг. 2) при давлениях от 2 до 9 ат и температуре до 380°С с естественной циркуляцией, смонтированного в топочную камеру парового котла и работавшего в очень тяжелых температурных условиях (экспериментальная труба была смонтирована прямо в непосредственной близости от зеркала горения топлива), показала его полную эксплуатационную

надежность. При средних тепловых нагрузках в топочной камере, доходивших до  $160\ 000\ \text{ккал/м}^2\ \text{час}$ , что соответствовало локальным нагрузкам порядка  $300\ 000\ \text{ккал/м}^2\ \text{час}$  и более, и скоростях циркуляции от близких к 0 до  $2\ \text{м/сек}$  температура стенки трубы, обращенная к раскаленному слою топлива, не превышала  $508^\circ\text{C}$ .

Скорость циркуляции, близкая к 0, достигалась посредством спуска теплоносителя из контура до условий полного разрыва циркуляции (прямоточный режим). При этом дифманометр, присоединенный к пневмометрической трубке, давал нулевые показания. Заделанные в стенку трубы термомпары при снижении скорости циркуляции не показывали увеличения температуры стенки. Указанное дает основание полагать, что коэффициент теплоотдачи к кипящей дифенильной смеси очень высок и мало зависит от скорости циркуляции. После проведения опытов был произведен осмотр внутренней поверхности, расположенной в топочной камере трубы. При осмотре поверхности оказалась совершенно чистой, без каких бы то ни было признаков коксообразования.

б) Если для вертикальных, интенсивно обогреваемых газами труб контура, работающего на дифенильной смеси, эксплуатация при самых разнообразных режимах показала вполне удовлетворительные результаты, то этого нельзя сказать о результатах работы горизонтальных труб. Для ряда режимов температура верхней образующей обогреваемой трубы подымалась до  $500^\circ\text{C}$  и установку приходилось выключать. Внутренний осмотр трубы показал значительное коксообразование на верхней образующей трубы.

в) На установках были применены вентили, фланцы, сальники и стекла для измерения уровня нормальной конструкции, применяемые для давления  $6\text{--}30\ \text{ата}$ . Прокладки были выполнены из тонкого паранита, сальниковые набивки из прографиченного асбеста, а у указательных стекол из резиновых колец. Опыт эксплуатации показал вполне удовлетворительную работу указанных устройств.

При внимательном и своевременном обслуживании утечки теплоносителя были полностью устранены.

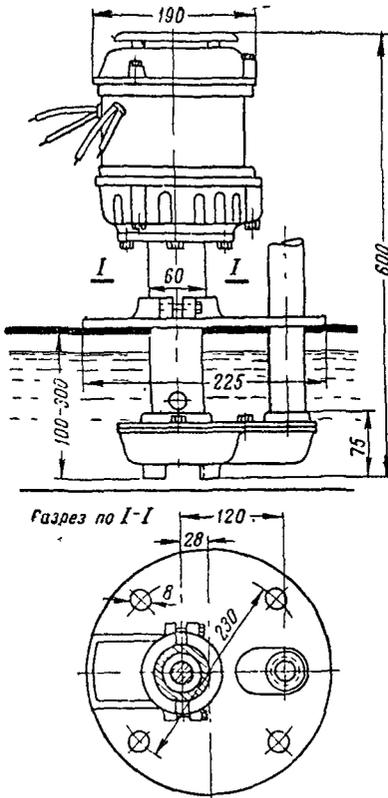
Не было зарегистрировано ни одного случая самовоспламенения дифенильной смеси при пропаривании через неплотности установки.

### III. ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ НА НЕОРГАНИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

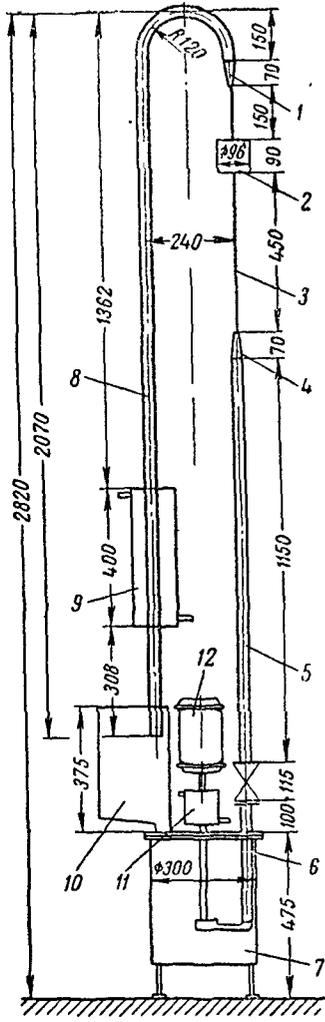
Первая лабораторная установка с естественной циркуляцией по изучению теплоотдачи к расплавленным солям нитритов и нитратов была сооружена в ЭНИН АН СССР в 1947 г.

В дальнейшем основной трудностью при сооружении установок с принудительной циркуляцией было подыскание бессальникового насоса, способного перекачивать жидкость при температурах до  $500^\circ\text{C}$ . В качестве такого насоса удалось подобрать серийный насос (фиг. 4) типа П-90 производительностью  $90\ \text{л/мин}$ . Указанный насос вертикального типа с погруженной крыльчаткой применяется для подачи охлаждающей эмульсии в металлообрабатывающих станках. Производительность насоса  $90\ \text{л/мин}$  при полном напоре  $10\ \text{м}$  столба перекачиваемой жидкости.

Для того чтобы предохранить электродвигатель насоса от воздействия высокой температуры теплоносителя, к электродвигателю был подведен сжатый воздух для охлаждения, а также сооружено охлаж-



Фиг. 4. Центробежный насос П-90.



Фиг. 5. Схема экспериментальной установки с принудительной циркуляцией на расплавленных солях.

1 — переход; 2 — специальный толстостенный электронагреватель; 3 — труба бесшовная диаметром 17/2,5; 4 — переход; 5 — труба бесшовная диаметром 32/2,5; 6 — труба газовая диаметром 1 1/4; 7 — насос типа П-90; 8 — труба бесшовная диаметром 32/3,5; 9 — холодильник; 10 — бачок для измерения расхода теплоносителя; 11 — охладитель вала двигателя; 12 — электродвигатель мощностью 0,65 квт.

дающее устройство на валу, соединяющем насос с двигателем. Как один из возможных вариантов была опробована конструкция с разрезным валом и установкой теплоизолирующей прокладки.

В насосе также была заменена крыльчатка, выполненная из алюминия, на стальную.

На фиг. 5 приведена одна из экспериментальных установок на расплавленных солях производительностью до 4 000 ккал/час.

На основании более чем трехлетней эксплуатации экспериментальных установок на расплавленных солях



можно сделать следующие выводы

а) Расплавленные соли состава (53%  $KNO_3$  + 40%  $NaNO_3$  + 7%  $NaNO_2$ ) могут успешно эксплуатироваться при температурах до 500° С и удельных тепловых потоках (передаваемых к солям) до 400 000  $ккал/м^2 \cdot час$ . При этом не было замечено за указанный период времени какого-либо изменения термокинетических свойств теплоносителя или его видимого разложения. Разогрев расплавленных солей при пуске установки или застывание солей при ее остановке не вызывали каких-либо затруднений. Как показал опыт, расплавление солей РС в баке желательнее производить, начиная с верхних слоев. Все трубопроводы экспериментальной установки перед пуском теплоносителя, как правило, разогревались (был предусмотрен оборот электрическим током). При разогреве теплоносителя до 200 ÷ 300° С установка включалась также и без предварительного разогрева.

б) Насос типа П-90, реконструированный в соответствии с вышеизложенным, работал вполне удовлетворительно и показал себя в эксплуатации достаточно надежным.

в) На установке для регулировки производительности был установлен пробковый кран сначала из алюминия, потом из бронзы, а затем стальной. Алюминий и бронза довольно быстро разъедаются теплоносителем и не могут быть рекомендованы для эксплуатации. Уплотнение кранов не вызывало особых затруднений.

В качестве прокладочного материала для фланцевых соединений в установке использовался листовая асбест.

Были случаи застывания теплоносителя в трубах установки. При этом «размораживание» ни разу не сопровождалось разрывом трубы.

#### IV. БИНАРНЫЕ КОТЛЫ ПО СХЕМЕ ЭНИН АН СССР НА ДИФЕНИЛЕ И ДИФЕНИЛЬНОЙ СМЕСИ

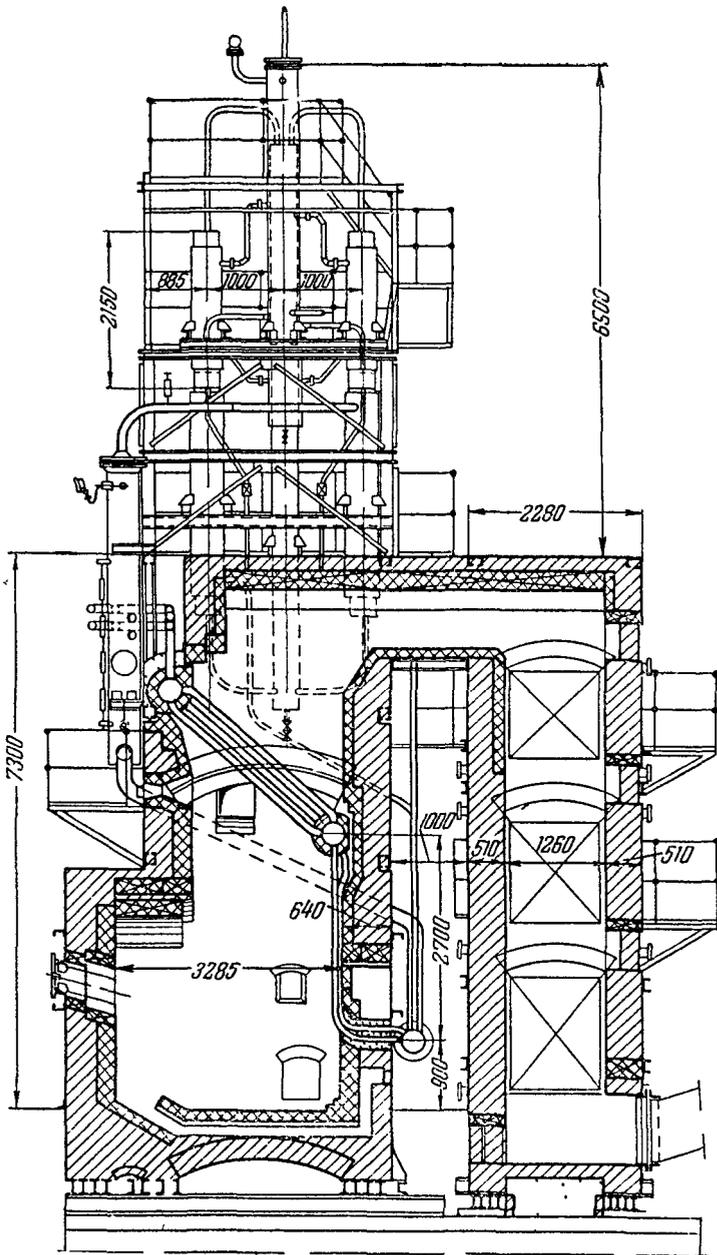
##### 1. Бинарный котел высокого давления конструкций ЦЭМ на ГЭС № 2

Бинарный котел производительностью по водяному пару 4  $т/час$  (1 600 000  $ккал/час$ ) и по пару теплоносителя 30  $т/час$  изображен на фиг. 6 [Л. 5].

Принципиальная схема бинарного котла приведена на фиг. 7.

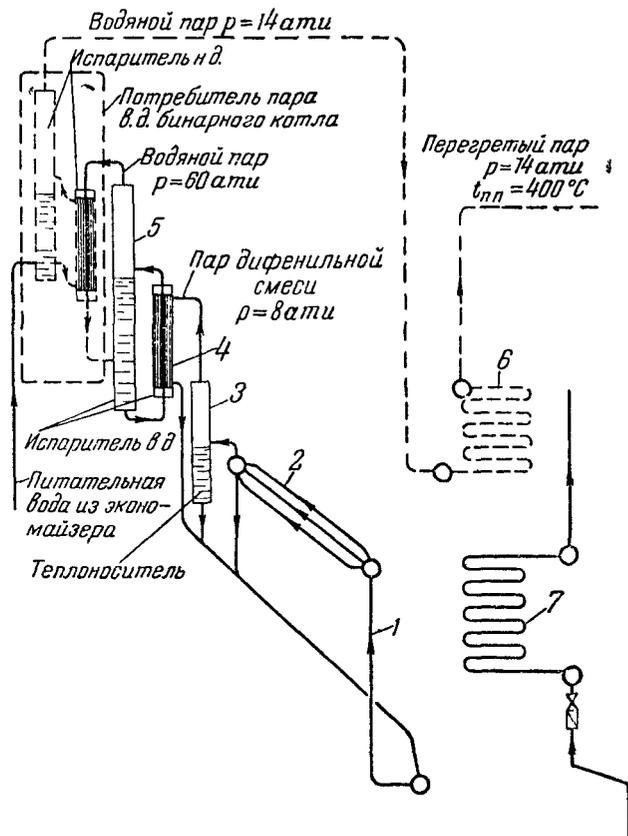
В бинарном котле насыщенный водяной пар высокого давления вырабатывается в отдельном испарителе 4 при помощи промежуточного высокотемпературного теплоносителя. Этот теплоноситель при низком давлении (2—8  $атм$ ) имеет температуру, более высокую, чем получаемый насыщенный водяной пар высокого давления. Нагревание промежуточного теплоносителя производится обычным способом в топке и газоходах котла.

Как видно из схемы, первичный контур котла, состоящий из экранов 1, конвективного пучка 2, сепаратора пара теплоносителя 3 и конденсатора-испарителя 4, заполнен высокотемпературным теплоносителем. Циркуляция теплоносителя естественная. Вторичный контур котла, состоящий из сепараторов высокого давления 5, конденсатора-испарителя 4, пароперегревателя 6 и водяного экономайзера 7 заполнен водой. Циркуляция воды естественная.



Фиг. 6. Бинарный котел высокого давления конструкции ЦЭМ по схеме ЭНИН АН СССР. Продольный разрез.

Таким образом, как видно из фиг. 6 и 7, бинарный котлоагрегат состоит из двух совершенно самостоятельных элементов обычного котлоагрегата низкого давления (можно любой конструкции), работающего на высокотемпературном теплоносителе вместо воды и небольшого вырабатывающего водяной пар испарителя высокого дав-



Фиг. 7. Принципиальная схема бинарного котла высокого давления.

ления, который сооружается при котле низкого давления. При этом поверхности высокого давления (обычно находящиеся в газовой зоне и работающие малоэффективно) перемещаются в конденсирующую среду, где теплопередача по сравнению с газовой средой повышается в  $50 \div 100$  раз. Этим значительно уменьшаются, а также выносятся из зоны огневого обогрева, поверхности высокого давления, причем последнее устраняет возможность пережога труб высокого давления и облегчает (что особенно важно) вопросы водоподготовки.

Принципиальной особенностью приведенной схемы бинарного котла является разделение процесса получения водяного пара на два этапа.

Первый этап — передача тепла в топке высокотемпературному теплоносителю (находящемуся под низким давлением) и второй этап — нагрев и испарение воды высокотемпературным теплоносителем.

Существенным преимуществом схемы бинарного котла является возможность использования существующих в промышленности большого парка котлов низкого давления для получения водяного пара повышенного или высокого давления. Одновременно от бинарного котла можно получать технологический пар высокотемпературного теплоносителя для непосредственного использования. Таким образом, старые конструкции, морально устаревшие, переходят на новую техническую ступень.

Необходимая для указанного переустройства реконструкция старых котлов низкого давления сводится в основном к сооружению испарителя пара повышенного или высокого давления и по возможности замены фланцевых и других соединений сварными

Ниже приводится техническая характеристика бинарного котла (фиг. 6).

Топливо — мазут, сжигание — камерное при помощи паровых форсунок.

Экранирована только одна стена топочной камеры, расположенная против мазутной форсунки. Экран выполнен из труб диаметром 60/54 мм с шагом 107 мм и высотой 2250 мм.

Эффективная радиационная поверхность экрана  $H_{экp}^{эф} = 5,14 \text{ м}^2$ .

Конвективный пучок котла трехрядный, выполнен из труб диаметром 60/54 мм с поперечным шагом 120 мм и расположен с наклоном в  $20^\circ$ .

Общая поверхность нагрева конвективного пучка  $H_{кон} = 24,5 \text{ м}^2$ , из них радиационная  $H_{кон}^{рад} = 5,61 \text{ м}^2$ .

Пароперегреватель поверхностью нагрева  $H_{пn} = 25 \text{ м}^2$  выполнен из труб диаметром 32/38 мм.

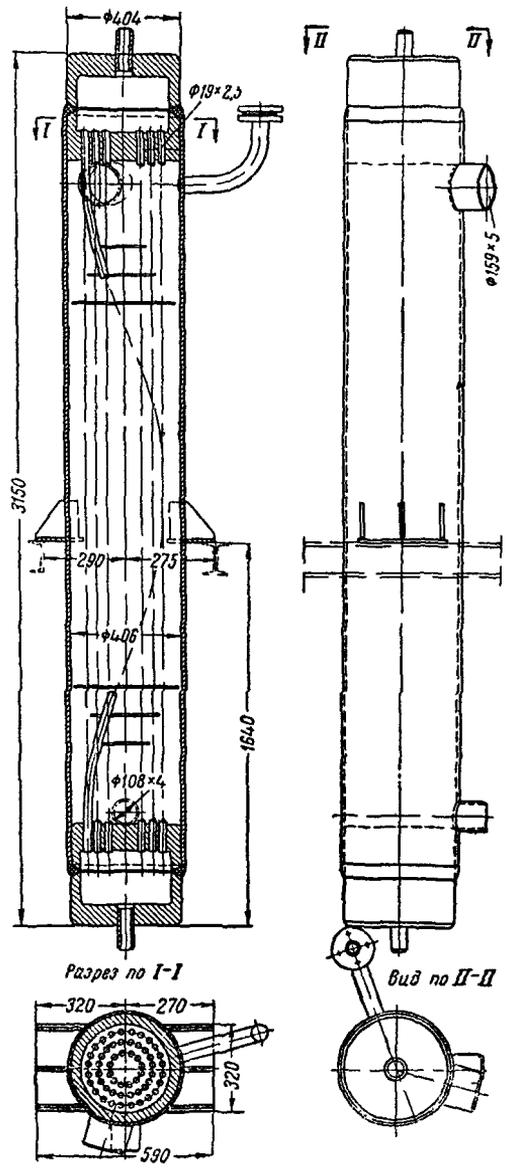
Водяной экономайзер поверхностью нагрева  $H_{эк} = 55 \text{ м}^2$  выполнен из труб диаметром 32/38 мм.

На котел установлены два теплообменника-испарителя высокого давления с поверхностью нагрева  $9,5 \text{ м}^2$  каждый (фиг. 8), выполненных из трубок диаметром 16/12 мм. Компенсация температурных деформаций труб теплообменника, зажатых между двумя трубными досками, предусмотрена за счет монтажа их по винтовой линии

Кратность циркуляции в контуре теплообменник-испаритель — сепаратор порядка  $1,5 \div 3$ . Сепаратор водяного пара высокого давления центробежного типа, диаметром 275 мм установлен на котел один (фиг. 9). Высота сепаратора 6,8 м, объем воды в сепараторе 348 л, напряжение парового объема сепаратора  $2000 \text{ м}^3/\text{час}$  и удельный паросъем с  $1 \text{ м}^2$  составляет  $427 \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ час}$ .

Общая емкость бинарного котла по воде  $0,676 \text{ м}^3$ . Общая емкость бинарного котла по дифенильной смеси  $1350—1400 \text{ л}$ .

На случай аварийного вытекания дифенильной смеси в больших количествах в топочную камеру предусмотрено тушение паром и во-



Фиг 8 Теплообменник-испаритель бинарного котла.

дой, которое, как показали опыты, проведенные ЦНИИПО МВД СССР, являются наиболее эффективными

В связи с тем, что пар высокого давления по техническим причинам в данной установке использовать не представлялось возможным, полученный пар конденсировали в конденсаторах испарителя типа, упомянутых выше, и уже полученный третичный пар с давлением 14 *ата* направлялся в паропровод станции

Таким образом, с точки зрения эксплуатации котел является триарным

Уровень в контуре с высокотемпературным теплоносителем измерялся тремя нормальными стеклами Клингера. Вся арматура на котле была установлена обычная стальная на давление 22 *ата*. Прокладки паранитовые

Контур низкого давления (с высокотемпературным теплоносителем) был оборудован значительным числом контрольно-измерительных приборов

Помимо обычных эксплуатационных измерений, производились измерения температуры стенок экранных труб (64 термопары) и труб конвективного лучка (59 термопар), а на шести трубах заднего экрана были установлены пневматические трубки для измерения скорости циркуляции теплоносителя

Было также установлено наблюдение за утечкой теплоносителя по показаниям стекол Клингера при определенной температуре. Все продувки и тому подобные утечки фиксировались и активировались

Описываемый бинарный котел проработал без единой аварии 4 000 час, из них 2 050 час без остановок

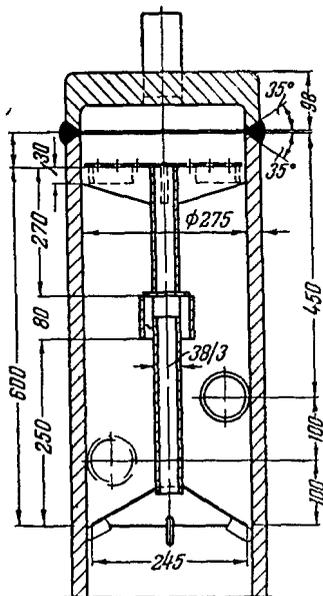
Из указанного периода времени 2 500 час котел работал на дифениле в первичном контуре и остальное время на дифенильной смеси

На основании опыта сооружения, эксплуатации и произведенных исследований работы бинарного котла можно сделать следующие выводы

а) Изготовление бинарного котла в мастерских ЦЭМ не встретило каких-либо особых затруднений

б) Эксплуатация бинарного котла мало чем отличается от эксплуатации обычного водяного котла и не требует особой квалификации обслуживающего персонала

в) При давлении паров дифенильной смеси и дифенила (в первое время работы) от 1 до 8 *ата* и температуре теплоносителя от 300 до 380°С давление выдаваемого водяного пара можно было поддерживать до 140 *ата* и регулировать в широких пределах (от 30 до 140 *ата*)



Фиг 9 Вертикальный центробежный сепаратор бинарного котла

г) Работа экранных поверхностей и конвективного пучка, омываемых топочными газами и подверженных их интенсивному излучению, показала полную надежность.

Температура стенок труб даже в самых теплонапряженных местах не превышала  $460^{\circ}\text{C}$ , что является допустимым для обычных углеродистых труб. При этом локальные средние тепловые нагрузки (по измерениям при помощи калориметрических трубок) достигали  $330\,000\text{ ккал/м}^2\text{ час}$ . Есть основание предполагать, что местные локальные тепловые нагрузки достигали в отдельных точках  $350\,000\text{—}400\,000\text{ ккал/м}^2\text{ час}$ .

Режим растопки (после доведения температуры дифенильной смеси до температуры кипения), а также резкие сбросы и набор нагрузки не оказывали существенного влияния на температуру стенки трубы.

Мгновенный сброс нагрузки с  $4\text{ т/час}$  до 0 при работающих форсунках дал увеличение давления в контуре теплоносителя в течение 9 мин. с  $3,4$  до  $6,7\text{ ата}$  и изменение скорости циркуляции в экранных трубах с  $1,25$  до  $1,03\text{ м/сек}$ , а подъем нагрузки с 0 до  $2\text{—}3\text{ т/час}$  дал снижение давления с  $6,7$  до  $6\text{ ата}$  через 6 мин.

С течением времени температура стенок не увеличивалась, что показывает, что коэффициент теплоотдачи к дифенильной смеси за прошедший период времени заметно не изменился.

г) Скорости циркуляции в заднем экране при всех режимах (кроме начала растопки) были вполне устойчивы и изменялись в пределах от  $0,7$  до  $1,3\text{ м/сек}$ . Эти скорости достаточно хорошо совпали с расчетными, подсчитанными по теоретическим формулам без учета относительной скорости пара (расчетная скорость при нагрузке  $4\text{ т/час}$   $\omega_0 = 0,69\text{ м/сек}$ , экспериментально измеренная при той же примерно нагрузке  $\omega_0 = 0,77 \div 0,87\text{ м/сек}$ ).

д) Установленная обычная стальная аппаратура с прокладками из паранита показала достаточную плотность и не требовала специального ухода.

е) При эксплуатации на дифениле в течение  $\sim 2500$  час. и на дифениловой смеси в течение  $1500$  час. не было необходимости добавления теплоносителя, так как по уровнемеру уменьшение уровня обнаружить не удалось. Специально поставленные наблюдения и произведенный анализ возможной ошибки в наблюдениях показали максимально возможные утечки порядка  $1\text{ л}$  в сутки.

ж) Работа теплообменников-испарителей конструкции ЦЭМ протекала вполне удовлетворительно. За все время эксплуатации не было замечено никаких дефектов.

Из специфических особенностей эксплуатации теплообменников-испарителей следует указать на необходимость тщательной их продувки при включении в работу.

При пуске котла теплообменники-испарители приходится продувать по нескольку раз. Следует при этом отметить, что продувать теплообменники надо не только из верхних точек, но и из нижних. Показателем того, что воздух из теплообменников-испарителей удален, служит выравнивание температуры пара и температуры конденсата из теплообменников, по которым и следует корректировать продувку теплообменников.

Вторым показателем успешности продувок является повышение производительности котла.

Коэффициент теплопередачи в теплообменниках-испарителях при температурном напоре от  $25$  до  $110^{\circ}\text{C}$  изменялся в зависимости от

режима работы на дифениле в пределах  $200-1300 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$ , а на дифенильной смеси  $800-1300 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$ .

Нижний предел значения коэффициента теплопередачи при работе на дифениле определялся степенью заполнения теплообменника конденсатом и, как следствие, выключения части поверхности нагрева. После проведенных переустройств (поднятие теплообменников-испарителей на  $0,5 \text{ м}$  и устройство дополнительной емкости) коэффициент теплопередачи получен в пределах  $800-1300 \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$ .

з) Вертикальные сепараторы центробежного типа давали хорошее качество пара; влажность пара при максимальных режимах котла и содержания котловой воды до  $17000 \text{ мг/л}$  не превышала  $0,1\%$ .

и) Анализ дифенила в первый период работы бинарного котла и дифенильной смеси в последующий период производился регулярно и показал уменьшение температуры застывания теплоносителя с  $12$  до  $4^\circ\text{C}$ , а также наличие фенола.

Однако эти изменения на температурном режиме труб не отразились и не оказали сколько-нибудь существенного влияния на его термомеханические свойства.

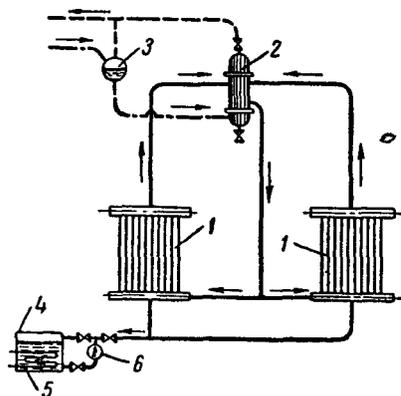
## 2. Бинарные котлы в легкой промышленности

В легкой промышленности получила развитие модификация подробно описанных в п. 1 «Бинарных котлов по схеме ЭНИН АН СССР».

Бинарные котлы в легкой промышленности используются для повышения производительности действующих котлов, а также в качестве самостоятельно работающих радиационных котлов [Л. 6].

На фиг. 10 представлена характерная для легкой промышленности схема установки. В табл. 5 даны основные характеристики двух установок.

Отличительной чертой бинарных котлов легкой промышленности является то, что они низкого давления и в том или ином виде пристраиваются к действующим котлам, используя конвективные поверхности последних в качестве котлов-утилизаторов со всеми вытекающими отсюда последствиями (повышение скоростей газов, увеличение температуры уходящих газов и т. п.). Сам же бинарный котел чисто радиационный встраивается либо в виде экранов в имеющуюся топчаную камеру или пристраивается самостоятельная дополнительная



Фиг. 10. Принципиальная схема парообразователя ВОТ с самостоятельной подачей воды в конденсатор-испаритель.

1 — радиационная поверхность; 2 — конденсатор-испаритель; 3 — питательный бак для воды; 4 — бак для ВОТ; 5 — змеевик; 6 — ручной насос.

Таблица 5,

Наименование	Размерность	Установка по фиг 10	
		на фабрике „Приводной ремень“	на Щербаковской фабрике
Полная поверхность генератора пара . . . . .	м <sup>2</sup>	2,6	5,17
Поверхность нагрева конвективной части . . . . .	м <sup>2</sup>	—	—
Поверхность нагрева испарителей	м <sup>2</sup>	3,4	12,17
Количество теплоносителя в установке . . . . .	кг	360	535
Давление пара теплоносителя . . . . .	кг/см <sup>2</sup>	0—1,8	0—2,5
Максимальная температура теплоносителя . . . . .	°С	285	302
Максимальная теплопроизводительность установки . . . . .	ккал/час	223 000	840 000
Давление вырабатываемого водяного пара . . . . .	кг/см <sup>2</sup>	6	6
Производительность по водяному пару . . . . .	кг/час	400	1 500
Объем топочного пространства . . . . .	м <sup>3</sup>	0,56	3,15
Площадь колосниковой решетки	м <sup>2</sup>	0,32	1,1
Топливо и способ сжигания . . . . .	—	Уголь АРШ на ручной решетке	Уголь АРШ и подмосковный на ручной решетке

топочная камера, отходящие газы из которой направляются в газоды действующего котла

В связи с указанным выше, показатели такого котла соответствуют показателям радиационных поверхностей, расположенных в топочной камере обычного котла

Легкая промышленность имеет уже длительный опыт эксплуатации предвключенных бинарных котлов среднего давления. Следует, однако, указать, что область применения бинарных котлов низкого давления сильно ограничена, так как они не имеют указанных выше преимуществ бинарных котлов высокого давления. В качестве теплоносителя в указанной схеме может применяться также и вода повышенного давления.

Опыт эксплуатации бинарных котлов низкого давления по схеме ЭНИИ АН СССР конструкции инж Браиловского в легкой промышленности показал следующее.

а) Эксплуатация бинарного котла мало чем отличается от эксплуатации обычного водяного котла

б) При давлении пара дифенильной смеси до 2,5 ата во вторичном контуре поддерживалось давление до 6 ата при температуре теплоносителя, не превышающей 305°С

г) За весь период работы дифенильных котлов легкой промышленности внутренняя поверхность нагрева котла не подвергалась очистке.

При этом внутренняя поверхность нескольких экранных труб, которые были вырезаны из котла, оказалась совершенно чистой (без коксообразования)

д) В ряде случаев имело место образование на экранных трубах, расположенных в топке, свищей, диаметром до 1 мм. На установке комбината имени Щербакова первый свищ был замечен более чем через 5 000 час работы

Есть предположение, что на установке комбината имени Щербакова свищи образовались в связи с плохим качеством материала экранных труб. Экран был собран из труб, бывших в употреблении, долгое время лежавших на открытом воздухе и поржавевших. Толщина стенок 2 мм. Если учесть, что дробы были покрыты ржавчиной и в дальнейшем подвергались внешней коррозии, то толщина стенки могла оказаться в отдельных местах и ниже допустимого предела

е) Попадание в топку и на раскаленную обмуровку дифенильной смеси взрывом не сопровождалось

ж) Регенерация дифенильной смеси на установках легкой промышленности не производилась

Как правило, не производилось также пополнение дифенильной смеси во время нормальной эксплуатации бинарного котла, т. е. утечка теплоносителя практически не имела места. Так, например, на установке комбината имени Щербакова за 5 300 час работы не наблюдалось уменьшения уровня дифенильной смеси в котле

Теплоноситель приходилось добавлять в котел только после его опорожнения в случае остановки на ремонт или по другим причинам. При этом количество добавляемого теплоносителя было очень небольшим и не учитывалось (порядка 50—100 кг)

Эксплуатация нормальной стальной арматуры (рассчитанной на давление 10 ата) показала ее пригодность для работы на дифенильной смеси без всяких переделок. Паранитовые прокладки работают вполне удовлетворительно

## V. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ОБОГРЕВОМ ДИФЕНИЛЬНОЙ СМЕСЬЮ

Применение технологического высокотемпературного обогрева дифенильной смесью получило распространение в отечественной промышленности после проведения приведенных выше исследований и в особенности после получения результатов эксплуатации первого полупромышленного бинарного котла конструкции ЦЭМ, разработанной по схеме ЭНИН АН СССР, показавшей практическую возможность успешного применения дифенильной смеси и дифенила для обогрева при температуре 360—380°С

Инициатором промышленного применения высокотемпературного обогрева оказалась химическая промышленность. В 1949 г. на химическом заводе пластмассовых изделий были введены в эксплуатацию две промышленные установки для обогрева теплообменных аппаратов дифенильной смесью. Эти установки, успешно работающие и в настоящее время, дали большой практический материал. В дальнейшем был сооружен еще целый ряд установок в химической промышленности и эти установки также успешно работают. Следует отметить, что хотя опыт работы бинарного котла на ГЭС № 2 для этих уста-

новок и использовался, но конструктивные элементы агрегатов получили самую разнообразную форму.

Ниже приводятся данные о конструкциях парогенераторов и о работе ряда установок химической промышленности. Эти данные не претендуют на полноту, но все же дают некоторое представление о типе применяемых парогенераторов и их эксплуатации.

### 1. Установки химического завода пластмассовых изделий

На заводе были введены в эксплуатацию две промышленные установки для обогрева теплообменных аппаратов дифенильной смесью. Одна установка обогревалась парами дифенильной смеси при давлении до 1,7 ата, а другая — работала на дифенильной смеси в жидкой фазе, с принудительной циркуляцией. В первой установке нагрев и испарение дифенильной смеси осуществлялись в парогенераторе, обогреваемом горячими газами за счет сжигания топлива, а во второй — имел место электрообогрев. Ниже приводится описание парогенератора первой установки и результаты эксплуатации обеих установок. Описание установки с электрообогревом как нехарактерной не приводится.

Промышленная установка в производстве пластификаторов для обогрева теплообменных аппаратов парами дифенильной смеси введена в эксплуатацию в январе 1949 г и явилась первой промышленной установкой в Министерстве химической промышленности, использующей в качестве теплоносителя дифенильную смесь.

При проектировании и конструктивной разработке элементов оборудования системы обогрева были использованы в качестве основных практических данных результаты экспериментальной проверки опытного бинарного котла на МГЭС № 2, проводившейся ЭНИИ АН СССР.

До указанного периода при проектировании аналогичных производств предусматривалось использование в качестве теплоносителя перегретой воды, что было сопряжено с применением высокого давления в системах обогрева и специальной дорогостоящей и сложной в изготовлении теплообменной аппаратуре (типа Фредеркинга и Замка).

В производстве пластификаторов химического завода дифенильная смесь применена для обогрева перегонных кубов, — предназначенных для процесса дистилляции. Исключительное значение для процесса дистилляции пластификаторов имеет равномерность обогрева перегонных кубов, так как наличие местных перегревов вызывает смолообразование и порчу продукта.

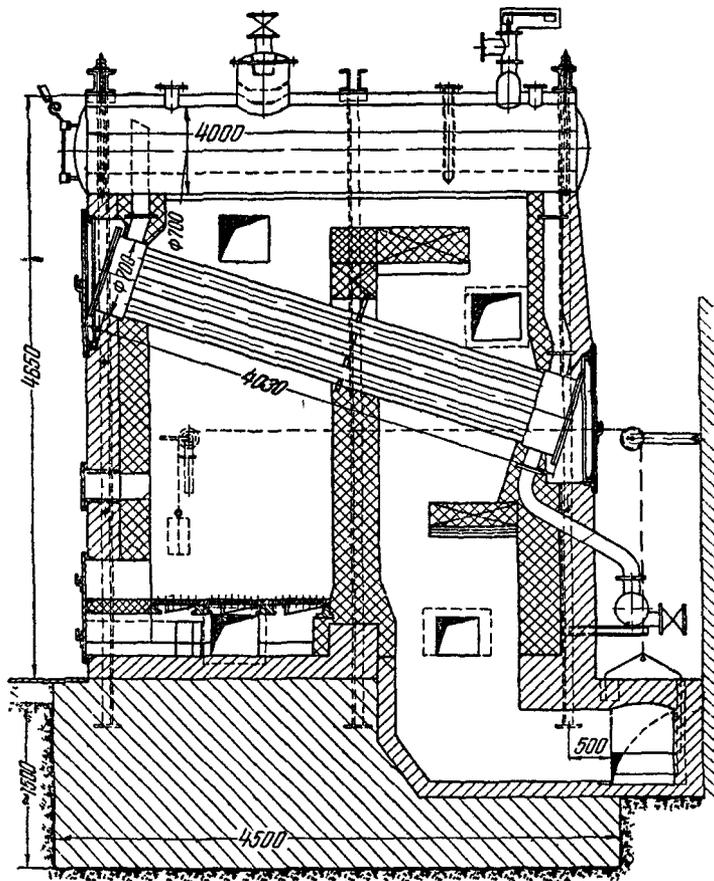
Обогрев перегонных кубов осуществлен паром дифенильной смеси с температурой 285°С, чему соответствует давление 1,7 ата. Расчетный максимальный расход тепла для процесса дистилляции принят при проектировании установки равным 200 тыс ккал/час.

На фиг. 11 представлена принципиальная схема обогрева перегонных кубов паром дифенильной смеси. Пар дифенильной смеси, получаемый в парогенераторе 7, по паропроводу через распределительный коллектор 14 поступает в рубашки перегонных кубов 1—4. Сконденсировавшийся пар дифенильной смеси по конденсаторопроводу возвращается в парогенератор. Удаление воздуха из системы обогрева производится из верхних точек рубашек перегонных кубов по специальному трубопроводу через холодильник 5. Заполнение парогене-



ратора дифенильной смесью производится из бака 11- при помощи шестеренчатого насоса.

Рассматриваемая система обогрева имеет два парогенератора, один из которых является резервным. Разность в уровнях нижних точек рубашек перегонных кубов и уровнем дифенильной смеси в ге-



Фиг. 12. Парогенератор дифенильной смеси завода пластмассовых изделий.

нераторе 3 м. При выборе типа парогенератора и при его конструктивной разработке учитывалась необходимость его срочного изготовления для данной установки силами завода.

Парогенератор (фиг. 12) поверхностью нагрева  $25 \text{ м}^2$  выполнен по типу камерного горизонтально-водотрубного котла Шухова с одним продольным барабаном и одной батареей, состоящей из передней и

задней цилиндрических камер и системы кипятильных труб, образующих поверхность нагрева парогенератора.

Барaban парогенератора сварной, диаметром 600 мм и длиной цилиндрической части 4 м изготовлен из стали толщиной 6 мм.

Камеры диаметром 630 мм и длиной 250 мм также сварные. Кипятильные трубы размером  $102 \times 4$  мм в количестве 19 шт. крепятся в трубных решетках путем развальцовки с последующей обваркой выступающих концов труб по окружности с внутренней стороны решетки. Съемные днища камер крепятся к фланцам камер болтами. Крепление батарей к барабану осуществлено посредством фланцевых соединений. Все фланцевые соединения в конструкции парообразователя и в том числе для съемных днищ камер выполнены по типу выступ-впадина с прокладками из паранита.

На барабанах парообразователей установлены мерные стекла типа Клингера В качестве запорных устройств в системе обогрева были применены обычные паровые стальные вентили на условное давление 25 ата, а также сильфонные прямоточные вентили, изготовленные заводом.

Для перекачки дифенильной смеси применен шестеренчатый насос производительностью 5 м<sup>3</sup>/час, имеющий один сальник удлиненной конструкции для выхода приводного вала, с набивкой из прографиченного асбестового шнура.

Парообразовательная установка смонтирована в изолированном помещении здания цеха. В качестве топлива для данной установки используется антрацит марки АРШ. Для сжигания твердого топлива парогенератор снабжен ручной колосниковой решеткой обычной конструкции площадью 0,9 м<sup>2</sup> с искусственным дутьем и естественной тягой.

Контроль за тепловым режимом парообразователя осуществляется путем измерения температуры пара дифенильной смеси на выходе из барабана парогенератора и температуры возвращаемого конденсата.

В качестве противопожарного мероприятия в помещение парогенератора и к топкам подведен трубопровод водяного пара.

Технические характеристики парогенераторов сведены в табл. 6.

Эксплуатация системы обогрева показала следующее:

а) За истекшие 6 лет эксплуатации системы обогрева паром дифенильной смеси, в производстве пластификаторов не было случаев нарушения необходимого режима теплоснабжения варочных кубов. Осуществленная система обогрева полностью обеспечивает ведение процессов дистилляции и соблюдение необходимого постоянства температуры и равномерности обогрева.

Длительная работа рассматриваемой системы обогрева со всей очевидностью подтвердила возможность ведения эксплуатации оборудования, работающего на дифенильной смеси, с использованием общедоступных технических средств, применяемых для эксплуатации другого оборудования этого производства.

Эксплуатация системы обогрева не представляет затруднений для персонала, обслуживающего как теплообменные аппараты, так и парообразователи. Непосредственное обслуживание работающего парообразователя осуществляется одним кочегаром.

б) Предполагавшаяся при монтаже установки необходимость применения специальных запорных устройств — сильфонных вентилях — не подтвердилась.

Наименование	Размерность
Полная поверхность парогенератора	$m^2$
Поверхность нагрева радиационной части . . . . .	$m^2$
Поверхность нагрева конвективной части . . . . .	$m^2$
Количество теплоносителя в установке . . . . .	кг
Давление пара теплоносителя . . .	кг/см <sup>2</sup>
Максимальная температура теплоносителя . . . . .	°C
Максимальная теплопроизводительность установки . . . . .	ккал/час
Объем топочного пространства . .	$m^3$
Площадь колосниковой решетки .	$m^2$
Топливо и способ сжигания . . . .	—
Год пуска установки в эксплуатацию , . . . . .	—

Таблица 6

Котел типа Шухова на заводе пластмассовых изделий (фиг. 12)	Котел типа Шухова на двух заводах МХП	Радиационный экраный котел (фиг. 13)	Вертикальный двухбарабанный котел (фиг. 14)
25	23,3	—	33
—	—	5,79	9,2
—	—	—	23,6
1 500	1 300	—	1 600
1,7	1,7	6,3	4,5
285	280	360	340
200 000	300 000	250 000	500 000
1,5	2,2	10	—
0,9	1,1	—	1,1
АРШ на ручной решетке	АРШ на ручной решетке	Мазут	Донецкий длиннопламенный на ручной решетке
1949	1951	1949	1952

В настоящее время все сильфонные вентили заменены запорными устройствами обычной конструкции

Применение в качестве прокладочного материала паранита обеспечивает необходимую плотность соединений

в) В период эксплуатации системы обогрева имели место случаи частичного опорожнения парогенератора за счет заполнения жидкой дифенильной смесью конденсатопровода

Частичное опорожнение парогенератора происходило вследствие того, что при регулировании температуры в варочных котлах путем дросселирования пара перед входом его в рубашки (частичное или полное закрытие вентилей) создавалось дополнительное гидравлическое сопротивление в паропроводе от парогенератора к варочным котлам. В связи с тем, что возврат конденсата в парогенераторы осуществлен в нижнюю часть барабана, заполненную жидкой дифенильной смесью, при создании дросселированием дополнительного сопротивления в паропроводе жидкая дифенильная смесь поднималась по конденсатопроводу, заполняя его, а также рубашки варочных котлов на высоту, зависящую от степени дросселирования пара.

Частичное опорожнение барабана парогенератора вызывало перегрев стенок барабана в нижней части, омываемой топочными газами, что неоднократно приводило к появлению трещин, как в сварных швах, так и в целом листе

При появлении трещин в барабане происходили утечка дифенильной смеси и ее загорание в газоходах котла, обнаруживаемые кочегаром, после чего принимались меры к остановке поврежденного парогенератора и к пуску в работу резервного. Проводившийся инструктаж персонала, обслуживающего варочные кубы, о необходимости при дросселировании пара одновременно производить регулировку вентилей на спусках конденсата из рубашек не ликвидировал указанные неполадки в связи с несоблюдением инструкций

Для повышения надежности системы обогрева ввод конденсатопровода произведен в паровое пространство барабана, а не в пространство, заполненное жидкой дифенильной смесью

Недостатком в конструкции парогенератора явилось также шахматное расположение кипяtilьных труб с небольшим шагом, что затрудняет их чистку от золы и приводит после длительного срока эксплуатации к забиванию межтрубных пространств.

Учитывая опыт эксплуатации системы обогрева, в настоящее время производится замена парогенератора № 2 с изменением его первоначальной конструкции в части расположения ввода в барабаны конденсатопровода, о чем указывалось выше, а также в части устройства коридорного расположения кипяtilьных труб и увеличения их количества с 19 до 23 шт.

Ремонт барабанов парогенераторов производился путем заварки трещин, а при появлении трещины на сварных швах — путем накладок и приварки бандажей

В конце 1952 г была произведена замена барабанов на обоих парогенераторах, после чего парогенератор № 1 работает без повреждений до настоящего времени.

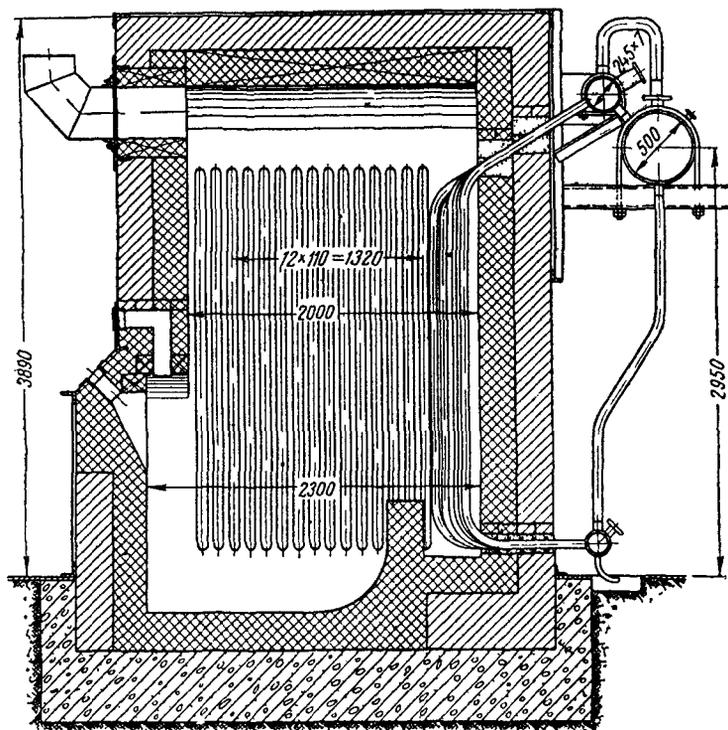
Горизонтально-водотрубные котлы типа Шулова, работающие на дифенильной смеси, нашли применение еще на двух предприятиях химической промышленности, на которых установлены четыре одина-

ковых котла. Поверхность нагрева одного котла  $23,3 \text{ м}^2$  и теплопроизводительность  $Q = 300\,000 \text{ ккал/час}$ . Трубы конвективного пучка соединены с трубными досками на сварке. Котлы на одном из предприятий оборудованы ручной решеткой на угле, а на втором — в качестве топлива применен газ.

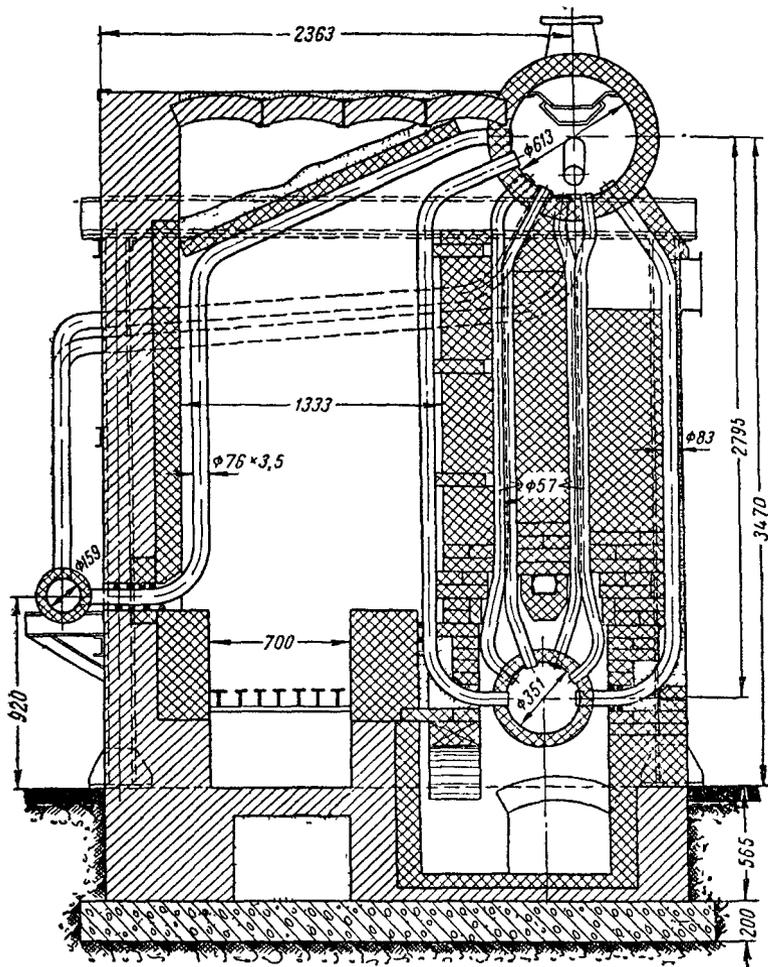
Установки работают без существенных дефектов на первом предприятии с 1950 г. и на втором — с 1951 г. Техническая характеристика парогенераторов приведена в табл 6

## 2. Установки в анилиноокрасочной промышленности

В анилиноокрасочной промышленности в эксплуатации находятся три установки, работающие на дифенильной смеси в паровой фазе. Все установки запроектированы Гипроанилиноокраской. В качестве парогенераторов для дифенильной смеси в упомянутых установках применены экранные котлы специальной конструкции (фиг. 13), горизонтально-водотрубные котлы типа Шухова и двухбарабанные котлы с конвективным пучком, образующим одновременно и топочную камеру



Фиг. 13. Радиационный парогенератор дифенильной смеси производительностью  $Q = 250\,000 \text{ ккал/час}$ .



Фиг. 14 Двухбарабанный парогенератор дифенильной смеси производительною  $Q = 500\ 000$  ккал/час.

(фиг. 14). Последняя из указанных конструкций принята Гипроанил-краской как типовая во всех последующих проектных разработках.

Изображенный на фиг. 13 радиационный экранный котел, сконструированный Гипроанилкраской, производительною  $Q = 250\ 000$  ккал/час работает с 1949 г (пять котлов)

Помимо коллекторов экрана, котел имеет также и барабаны диаметром 500 мм. В своем первоначальном оформлении котел был скон-

струирован как безбарабанный. Функцию барабана выполняли коллекторы диаметром 150 мм. После пуска безбарабанный котел имел ряд аварий (порежог экранных труб), связанных с недостаточной циркуляцией, и был реконструирован (установлены барабаны). После реконструкции котел работает по настоящее время и не имеет аварий. Для предотвращения прямого удара факела в экранные трубы мазутная горелка несколько наклонена вниз на под топку, где имеется защитный козырек.

На фиг. 14 изображен двухбарабанный котел производительностью  $Q = 500\,000$  ккал/час. Два таких котла работают с 1952 г.

Высота котельного агрегата несколько больше 3 м, диаметр верхнего барабана 820/10 мм, нижнего барабана 426/11 мм. Котел выполнен из труб 76/3,5 мм (радиационная часть) и 57/3,5 мм (конвективная часть).

Присоединение труб к барабанам котла выполнено на сварке. Оригинально выполнена конвективная часть котла

Все основные данные по приведенным выше парогенераторам сведены в табл. 6

К интересным конструктивным особенностям парогенераторов, выполненных Гипроанилкраской, следует отнести: а) отсутствие предохранительных клапанов на барабане котла, они заменены взрывными клапанами (хлопушками) и б) возврат конденсата дифенильной смеси (питание котла) осуществлен в паровое пространство барабана (вместо петли Гортфорда)

Эксплуатация парогенераторов упомянутых выше установок позволяет сделать следующие выводы:

а) Все три приведенных в данном разделе конструктивно различных парогенератора пара дифенильной смеси оказались работоспособными.

б) Эксплуатация парогенераторов на дифенильной смеси мало чем отличается от эксплуатации обычных паровых котлов, вырабатывающих водяной пар.

в) За период работы от 1½ до 4 лет парогенераторы на дифенильной смеси показали себя достаточно надежными. Поверхности нагрева двухбарабанного парогенератора теплопроизводительностью 500 000 ккал/час после 14-месячной работы оказались совершенно чистыми со стороны дифенильной смеси.

г) На всех установках была применена обычная стальная арматура на давление от 16 до 40 ата.

Опыт эксплуатации арматуры показал ее пригодность для работы на дифенильной смеси. В качестве прокладочного материала был применен паранит

д) Попадание в топку и на раскаленную обмуровку дифенильной смеси не сопровождалось какими-либо неприятностями

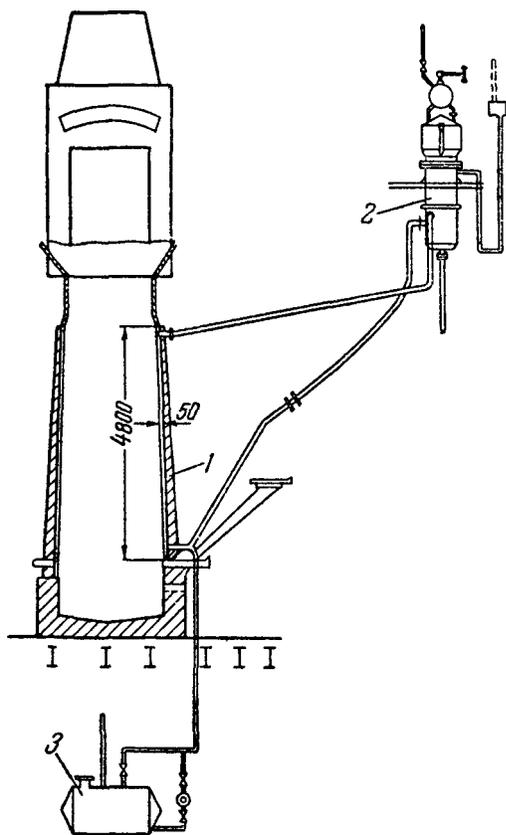
### 3. Установка для охлаждения ватержакетных печей

Ряд производственных процессов связан с отводом значительного количества тепла из систем водяного охлаждения. В большинстве случаев это тепло вовсе не используется или используется в небольших размерах (от поверхностей охлаждения мартеновских, доменных, ватержакетных печей, вагранок и других агрегатов).

Объясняется это тем обстоятельством, что, как правило, температура нагрева охлаждающей воды не превышает 40—60°С (в слу-

чае применения испарительного охлаждения — пар давлением 2—3 *ата*), а потребителей тепла такого низкого потенциала немного.

Повышение потенциала тепла, отводимого из систем охлаждения производственных агрегатов, по сравнению с существующим уровнем (40—60° С) является необходимой предпосылкой для возможности



Фиг. 15. Схема охлаждения дифенильной смесью ватержакетной печи.

1 — охлаждающее устройство, 2 — сепаратор-испаритель, 3 — сливной бачок.

его использования. Чем выше этот потенциал, тем лучше экономические и энергетические показатели теплоиспользования.

Необходимой предпосылкой к повышению потенциала является обеспечение бесперебойного отвода тепла от охлаждаемых поверхностей при безнакипном режиме их эксплуатации. Возможность такого охлаждения была доказана работами ЭНИИ

На фиг. 15 приведена схема опытной промышленной установки охлаждения ватержакетной печи при помощи дифенильной смеси. Производительность установки 450 000 ккал/час. Установка пущена на никелевом комбинате в 1953 г и работает бесперебойно.

Охлаждающее устройство одной ватержакетной печи представляет собой стальную камеру шириной 50 мм и высотой 4800 мм.

Дифенильная смесь охлаждает камеру и при этом нагревается и испаряется. Парожидкостная эмульсия поступает в сепаратор — испаритель 2, где отделившийся дифенильный пар направляется на использование, а сепарат стекает в охлаждающее устройство.

Таким образом, в установке осуществляется естественная циркуляция дифенильной смеси. Для заполнения установки дифенильной смесью и спуска ее служит сливной бачок 3. Рабочая температура теплоносителя достигает 270° С.

Результаты эксплуатации установки показали практическую возможность применения высокотемпературных теплоносителей для использования тепла охлаждения металлургических печей.

## VI. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С МАСЛЯНЫМ ОБОГРЕВОМ

### 1. Установка на заводе «Стеол» парфюмерной промышленности

На заводе «Стеол» установки с масляным обогревом при рабочей температуре 280° С эксплуатируются с 1939 г.

В связи с длительностью работы масла как теплоносителя при указанной выше высокой температуре (280° С) результаты эксплуатации установок завода «Стеол» являются особенно интересными.

На заводе «Стеол» установлены три самостоятельно работающие установки с использованием в качестве теплоносителя масла марки Вапор-Т, нагреваемого в специальных печах. Конструктивно все три печи для подогрева масла мало отличаются друг от друга, поэтому ограничиваемся описанием одной из них.

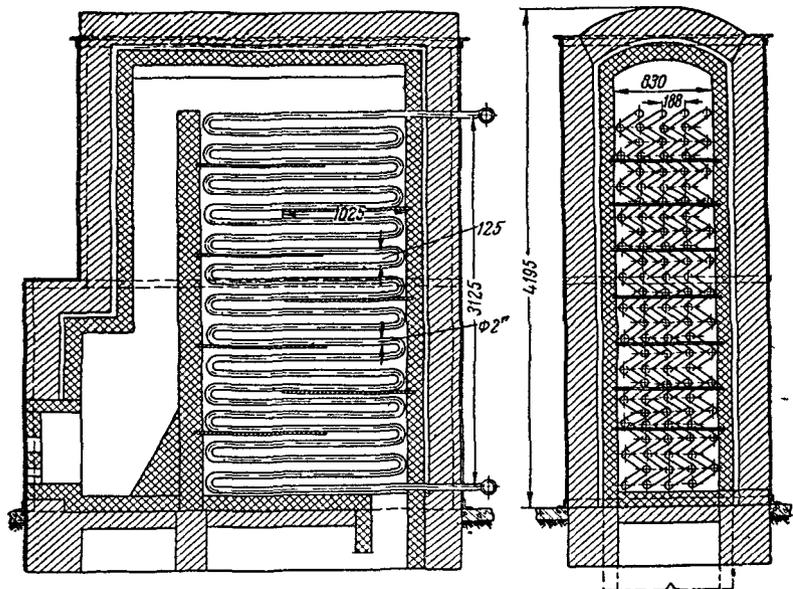
Печь для нагрева масла (фиг. 16), т. е. масляный котел, состоит из змеевика, выполненного из труб диаметром 2" и расположенного двумя рядами в газоходах, и топки, работающей на газе. Топка полнена так, что открытое пламя не лижет змеевиков котла. Первоначально несколько рядов змеевиков нагревались открытым пламенем и на этих витках змеевика появились свищи. Повидимому, указанное явление было вызвано малыми скоростями (менее 1 м/сек) циркуляции масла в змеевиках котла.

Поверхность нагрева котла составляет 31,6 м<sup>2</sup> и теплопроизводительность  $Q = 200\,000$  ккал/час. Масло подается в котел обычным шестеренчатым насосом. Первоначально был поставлен насос производительностью около 30 м<sup>3</sup>/час, а затем заменен таким же насосом производительностью 19 м<sup>3</sup>/час. На фиг. 17 приведена принципиальная схема установки, работающей на масляном обогреве.

Следует отметить, что масляный котел находится в очень тяжелых условиях эксплуатации, так как установка останавливается на ремонт только раз в год. Остальное время по условиям производства масляный котел должен работать непрерывно.

Как уже указывалось, в начальный период работы масляных котлов имело место несколько случаев прогара труб котла. В 1951 г вследствие повышения температуры масла выше рабочей имел место

случай полимеризации масла в системе, и змеевики котла оказались заполнены резинообразной массой. Эти своеобразные резиновые трубы удалось удалить из змеевиков котла при помощи прокачивания горячего свежего веретенного масла, которое выдавило из змеевиков полимеризованную массу. В качестве профилактической меры против полимеризации масла его меняют ежегодно 1 раз (целиком всю систему — около 1 000 кг). Длительная эксплуатация масляного обогрева на установках завода «Стеол» позволяет сделать следующие выводы:



Фиг. 16 Змеевиковый масляный котел завода „Стеол“

а) Применение в качестве теплоносителя масла марки Вapор-Т позволяет при длительной эксплуатации держать рабочую температуру  $280^{\circ}\text{C}$

б) За 12 мес работы (до замены) не наблюдается изменения качества масла

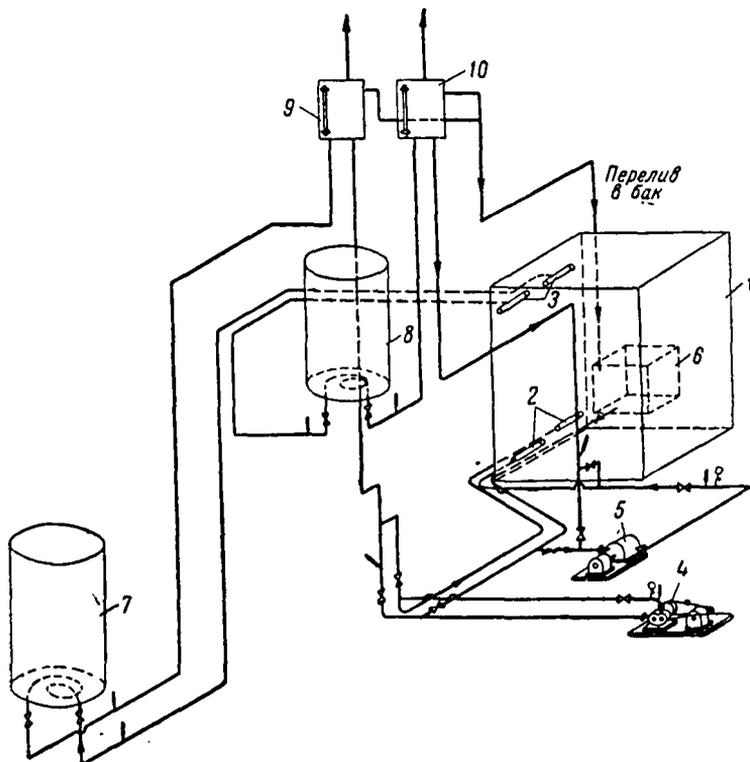
в) Обслуживание масляных котлов не требует квалифицированного персонала. Наблюдение за правильностью работы масляных котлов ведется по температуре масла в котле на входе и выходе. В ряде случаев обслуживание котла производится аппаратчиками технологических установок параллельно с их основной работой.

г) Масляный обогрев позволяет поддерживать рабочую температуру технологического процесса (не применяя автоматики) в пределах  $\pm 1-2^{\circ}\text{C}$

д) Для трубопроводов возможно использование обычных стальных и чугунных вентиля и кранов. В качестве прокладочного материала

с успехом может применяться паранит, для сальников — прографиченный асбестовый шнур. Работа шестеренчатого насоса протекает нормально и не требует измененной конструкции насоса.

е) Масло перед употреблением должно освобождаться от влаги.



Фиг. 17. Принципиальная схема масляного обогрева на заводе „Стеол“.

1 — выпарная печь; 2, 3 — коллекторы; 4 — насос шестеренчатый производительностью  $15 \text{ м}^3/\text{час}$ ; 5 — насос ротационный производительностью  $18 \text{ м}^3/\text{час}$ ; 6 — приемный бак для масла (Вапор-Т); 7 и 8 — дистилляционные кубы; 9, 10 — расширительные баки.

## 2. Установка на заводе имени Владимира Ильича

На заводе имени Владимира Ильича установлены два масляных котла производительностью по  $750\,000 \text{ ккал}/\text{час}$  каждый, обогреваемых открытым пламенем при сжигании жидкого топлива.

Масляные котлы вступили в эксплуатацию с 20 октября 1953 г. Котлы змеевикового типа с принудительной циркуляцией сконструированы и изготовлены заводом. Масло подогревается до  $240^\circ \text{С}$ , средняя рабочая температура теплоносителя  $220^\circ \text{С}$ .

Особо следует отметить то обстоятельство, что на заводе имени Владимира Ильича применяется дешевое цилиндрическое масло стоимостью 75 коп. за 1 кг.

Опыт эксплуатации упомянутых выше установок позволил выявить следующее:

а) При правильно рассчитанных и спроектированных установках с масляным обогревом рабочая температура масла может допускаться до  $220\text{--}280^\circ\text{C}$ . При этом масло работает без смены длительное время, измеряющееся годами. В установках с электрообогревом особое внимание следует обращать на недопустимость возникновения местных перегревов, которыми в основном вызывается преждевременное коксование масла. Не следует допускать удельных теплонпряжений поверхности элементов электронагревателей выше  $10\,000\text{--}30\,000\text{ ккал/м}^2\text{ час}$  (в зависимости от организации циркуляции масла).

При расчете поверхностей нагрева масляного котла, обогреваемого топочными газами, следует исходить из максимально допустимой температуры стенки трубы, не превышающей  $300^\circ\text{C}$ .

б) В первый период эксплуатации котлов с огневым обогревом в связи с попаданием влаги в систему циркуляции масла имели место выбросы масла из системы в буферный бак и из вестовой трубы на крышу (порядка  $10\text{--}30\text{ кг}$ ). В последующий период эксплуатации выбросы масла прекратились.

в) Для перекачивания горячего масла циркуляционный однодисковый центробежный насос и шестеренчатый насос обычной конструкции показали достаточную надежность эксплуатации. Небольшая утечка масла через сальники собирается в противни, установленные под насосы, и подается обратно в масляную систему.

Соединения трубопроводов в основном выполнены на сварке. Установленная обычная стальная арматура с прокладками из паранита показала достаточную плотность.

г) Постоянство температуры масла на выходе из котла, обогреваемого топочными газами, удалось поддерживать в различных секциях в пределах  $\pm 1\text{--}5^\circ\text{C}$ . Температура масла легко и плавно поддается регулировке.

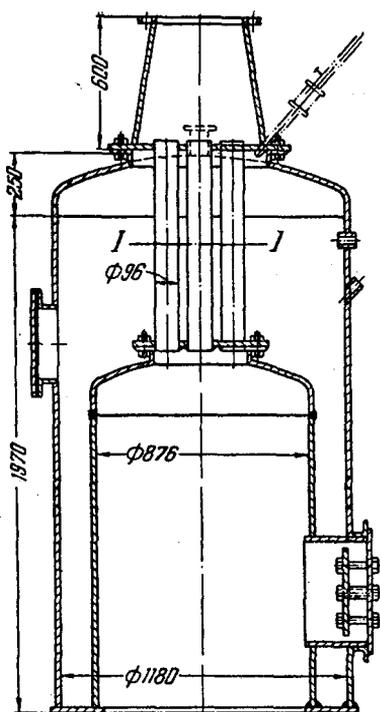
## VII. УСТАНОВКИ С ОБОГРЕВОМ ГЛИЦЕРИНОМ

Глицерин как теплоноситель применен сравнительно недавно [Л. 7]. Наибольший интерес представляют установки на Московском электромашиностроительном заводе [Л. 8] Министерства электротехнической промышленности и на Московском металлическом заводе нефетары Министерства нефтяной промышленности.

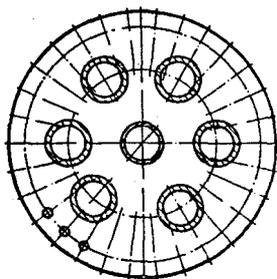
1. На электромашиностроительном заводе установлен вертикальный котел типа Шухова поверхностью нагрева  $H_k = 16,5\text{ м}^2$ , сконструированный инж. А. Б. Гатеевым и изготовленный на заводе. Котел вместо воды полностью заполняется глицерином, который прокачивается через котел при помощи центробежного электронасоса. Котел снабжен ручной колосниковой решеткой, работающей на антраците.

Максимальная температура теплоносителя  $200^\circ\text{C}$ . Установка работает с 30 апреля 1951 г.

После того как котел проработал около 5 000 час, произошел прогар горизонтальных циркуляционных труб. Прогар труб был обна-



По 1-1



Фиг. 18. Котел для подогрева глицерина на Московском электромашиностроительном заводе.

теплоотдачи, что может вызвать перегрев стенки и, как следствие, коксообразование. Никаких измерений температур стенки котла не производилось.

ружен по горению в топке. Никакого хлопка или выброса пламени из топки не произошло.

В дальнейшем прогорание трубок имело место неоднократно примерно с таким же результатом.

При осмотре прогоревшей трубы и других труб выяснилось, что почти все сечение труб забито коксообразной массой. Удалить эту массу оказалось возможным только при помощи выжигания раскаленным железным прутом с последующим обстучиванием поверхности нагрева молотком. Прогоревшая труба была смонтирована, а остальные трубы очищены указанным выше способом. При дальнейшей эксплуатации регулярно продолжали прогорать циркуляционные трубы из-за коксообразования.

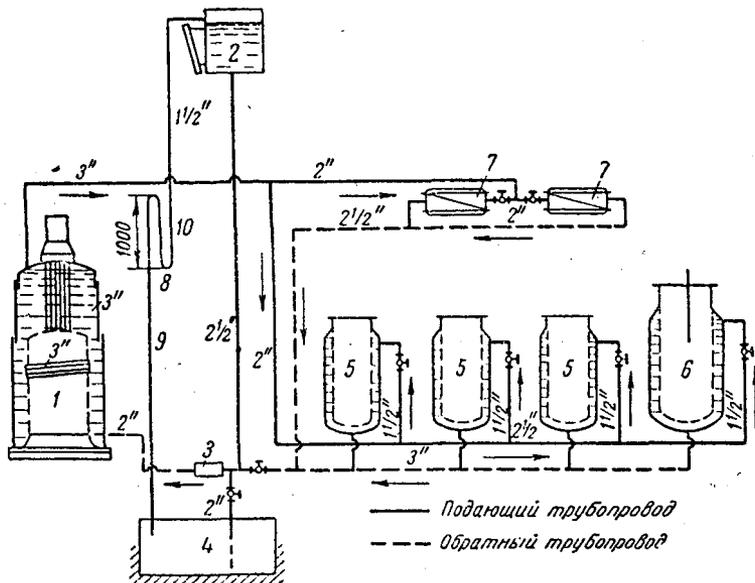
Через 2½ года котел был заменен новым, также выполненным силами завода (фиг. 18). Котел отличается от первого отсутствием горизонтальных труб. Одновременно система была заполнена новым глицерином. Примерно через 8 000 час. после первого пуска глицериновой установки было обнаружено закупоривание трубок теплообменных аппаратов. В трубках был обнаружен плотный осадок темносерого цвета, который приходилось выжигать.

Схема пропиточной установки приведена на фиг. 19.

Следует отметить две причины, повлиявшие на коксообразование в глицериновой установке:

а) Неудачный выбор в качестве глицеринового котла — котла типа вертикального Шухова, для производства водяного пара. Котел Шухова рассчитан на циркуляцию пароводяной смеси, на жидком же глицерине имеют место очень малые скорости и соответствующие коэффициенты

б) На заводе имеют место неоднократные (иногда несколько раз в сутки) кратковременные (до 5 мин.) отключения электроэнергии и остановка циркуляционного глицеринового насоса. При этом, как правило, топку котла не тушат. Такие остановки также могут вызывать местные значительные перегревы глицерина и, как следствие, коксообразование за счет резкого ухудшения теплоотдачи при остановке циркуляционного насоса.



Фиг. 19. Принципиальная схема пропиточной установки, обогреваемая глицерином.

1 — вертикальный котел Шухова поверхностью нагрева 16,5 м<sup>2</sup>; 2 — расширительный бак; 3 — шестеренчатый насос РЗ-30; 4 — аварийный бак; 5 — автоклавы для вакуумной сушки и пропитки; 6 — автоклав для разогрева компаундной массы; 7 — калориферы для подогрева воздуха; 8 — водомерное стекло; 9 — переливная труба; 10 — гидравлический затвор.

2. На заводе нефтетары в качестве глицеринового котла использован старый вертикальный котел Шухова поверхностью нагрева 30,5 м<sup>2</sup>.

Для обеспечения циркуляции глицерина установлены два центробежных насоса 2К-6. Котел снабжен ручной колосниковой решеткой, работающей на подмосковном угле. Максимальная температура теплоносителя 280°С.

Принципиальная схема установки показана на фиг. 20. Установка проработала 1200 час. Техническая характеристика установок приведена в табл. 7.

Опыт эксплуатации установок, работающих на глицерине, позволяет сделать следующие предварительные выводы:

Таблица 7

Наименование	Размерность	Установка на электромеханическом заводе	Установка на металлическом заводе нефтетары
Тип котла и его полная поверхность . . . . .	м <sup>2</sup>	По типу Шухова 16,5	Вертикальный котел Шухова 30,65
Давление в котле . . . . .	кг/см <sup>2</sup>	1,5	1,2
Теплоноситель . . . . .		Глицерин	Глицерин
Количество теплоносителя в установке . . . . .	л	2 700	4 000
Максимальная температура теплоносителя . . . . .	°С	200	280
Максимальная теплопроизводительность установки	ккал/час	250 000	490 000
Топливо и способ сжигания		Антрацит на ручной решетке	Подмосковный уголь на ручной решетке
Объем топочного пространства . . . . .	м <sup>3</sup>	—	5,37
Площадь колосниковой решетки . . . . .	м <sup>2</sup>	—	2,07
Тип и характеристика циркуляционного насоса . . . . .		Шестеренчатый РЗ-30	2К-6 производительностью 30 м <sup>3</sup> Н=19 м

а) Установку с глицерином в качестве теплоносителя могут надежно работать при рабочей температуре до 240° С.

б) Примерно через 5 000—6 000 час. работы на глицерине наблюдается значительное выпадание образовавшегося в теплообменниках кокса. Этот осадок легко удаляется механическим способом при помощи раскаленных железных прутков. Причины коксообразования в теплообменниках не установлены.

в) Доказана на практике возможность использования старых вертикальных котлов Шухова для нагрева глицерина до  $t = 280^{\circ}\text{C}$  без каких-либо переделок.

г) Имели место случаи выброса глицерина из установки, видимо, вследствие попадания в глицерин воды.

д) Обычный однодисковый насос типа 2К-6 проработал 1 200 час. при 200—280° С, а шестеренчатый насос типа Р-3-30 проработал 20 000 час. при температуре 200° С и никаких существенных дефектов не было замечено.

е) При использовании глицерина в жидкой фазе целесообразно применять змеевиковые котлы, дающие возможность обеспечить большие скорости жидкости. Для котлов других конструкций обязателен расчет циркуляции с проверкой максимальной температуры стенки котла. Эта температура не должна превышать 300° С.



## VIII. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПРИМЕНЯЕМЫМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМ

### 1. Органические теплоносители

#### а) Физико-химические свойства

Данные по физико-химическим свойствам дифенила, дифенилового эфира, дифенильной смеси, нафталина, глицерина и других органических теплоносителей представлены в табл. 1, 2, 8, 9 и 10.

**Хлоропроизводные дифенила.** Хлорирование дифенила производится для уменьшения его горючести. В СССР хлорированный дифенил производится и применяется как трансформаторное масло, известное под названием совол. Известно [Л. 9] также применение в качестве теплоносителя тетрахлордифенила, по своим свойствам мало отличающегося от совола. Химически чистый совол и тетрахлордифенил при комнатной температуре — бесцветная жидкость. Технический продукт имеет желтоватый оттенок, почти без запаха.

Температура кипения тетрахлордифенила  $340^{\circ}\text{C}$ ; температура плавления  $-7^{\circ}\text{C}$ . По некоторым данным [Л. 9] тетрахлордифенил термически устойчив до температуры  $340^{\circ}\text{C}$ . Исследования, проведенные в МИХМ А. М. Ластовцевым, показали термическую устойчивость хлоропроизводных дифенила только до  $300^{\circ}\text{C}$ , при этом в жидкой фазе.

Коррозионное воздействие тетрахлордифенила на различные материалы при температуре  $325^{\circ}\text{C}$  характеризуется следующими цифрами [Л. 9]: мягкие углеродистые стали —  $0,07$  мм/год, медь —  $0,037$  мм/год, латунь —  $0,012$  мм/год.

Тетрахлордифенил практически не горюч.

Основным крупным недостатком тетрахлордифенила является большая его токсичность. Предельно допустимая концентрация паров тетрахлордифенила в помещении —  $0,5$  мг/м<sup>3</sup>.

Другие данные по тетрахлордифенилу приведены в табл. 8 [Л. 10].

Таблица 8

Наименование	Размерность	Температура, $^{\circ}\text{C}$			
		100	120	200	300
Давление тетрахлордифенила . . . . .	кг/см <sup>2</sup>	0,000217	—	0,0245	0,488
Удельный вес жидкости	кг/м <sup>3</sup>	1,370	—	1,270	1,170
Теплотинная теплоемкость жидкости . . . . .	ккал/кг $^{\circ}\text{C}$	0,405	0,44	—	—
Динамическая вязкость . . . . .	$10^6$ кг/сек/м <sup>2</sup>	400	—	100	50
Теплопроводность . . . . .	ккал/м час $^{\circ}\text{C}$	0,121	—	—	—

**Тетракрезилоксисилан (тетракрезилсиликат)** в настоящее время нашей промышленностью в больших масштабах не выпускается. Тетракрезилоксисилан является эфиром кремниевой кислоты и кресто-

ла. При комнатной температуре тетракрезилоксисилан — жидкость светлокоричневого цвета.

Температура кипения тетракрезилоксисилана 435—440° С. Температура плавления — 36° С.

Удельный вес — 1120 кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость при 20° С  $\mu = 4020 \cdot 10^{-6}$  кг·сек/м<sup>2</sup> и при 65° С  $750 \cdot 10^{-6}$  кг·сек/м<sup>2</sup>, теплоемкость 0,43 ккал/кг°С и теплопроводность в пределах температур от 150 до 315° С близка к теплопроводности воды.

По некоторым сообщениям, появившимся в иностранных журналах [Л. 11, 12, 13], тетракрезилоксисилан термически стоек до рабочей температуры 315° С, мало горюч, взрывобезопасен и не корродирует с обычными сталями. Тетракрезилоксисилан может быть использован только в жидкой фазе, так как пары его легко разлагаются.

В присутствии влаги происходит гидролиз тетракрезилоксисилана. В СССР исследования тетракрезилоксисилана как теплоносителя производятся МЭИ.

**Глицерин.** Производится в больших количествах. Химическая формула глицерина  $C_3H_5(OH)_3$ . В качестве теплоносителя может быть рекомендован химически чистый глицерин. При комнатной температуре глицерин — жидкость бесцветная и без запаха, не токсичен, весьма гигроскопичен и может поглотить из воздуха до 40% воды. Молекулярный вес глицерина 92; температура кипения 290° С, температура плавления — 18,6° С. Незначительное присутствие в глицерине растворенной воды резко снижает его температуру кипения. Так, при наличии примеси воды в 3% температура кипения глицерина снижается до 186° С. Глицерин горюч. Термическая стойкость глицерина как теплоносителя не изучалась, однако имеющийся опыт эксплуатации установок; работающих на жидком глицерине как теплоносители [Л. 7], и лабораторных исследований по теплообмену дает основание полагать о возможности использования глицерина в качестве теплоносителя при температурах 180—240° С.

Глицерин разлагается под действием ультрафиолетовых лучей. При интенсивном освещении разложение глицерина на углекислоту, альдегиды и кислоты происходит довольно быстро.

Глицерин не дает коррозии со сталью, медью, алюминием и металлом Монеля [Л. 14].

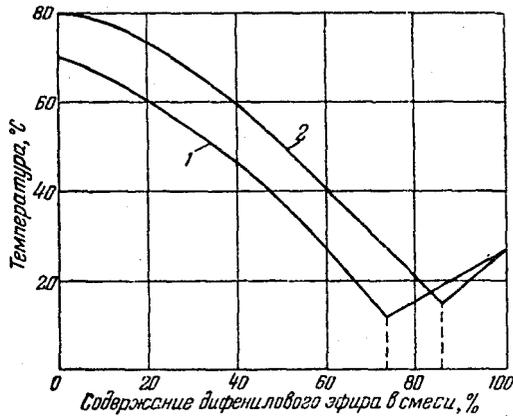
Другие данные по глицерину сведены в табл. 9.

**Нафталиновые смеси.** В связи с тем, что нафталин наименее дефицитный и наиболее дешевый из органических теплоносителей, вполне понятны попытки получения теплоносителей при его участии.

Следует при этом указать, что предел применения нафталиновых смесей по температуре в основном определяется термостойкостью нафталина, т. е. ограничен величиной порядка 320° С. В качестве примера можно привести двойную смесь нафталина (15%), дифенилового эфира (85%) и тройную смесь нафталина (15%), дифенилового эфира (59,5%), дифенила (25,5%). Температура плавления смеси нафталин — дифениловый эфир +16° С, а смеси нафталин — дифениловый эфир — дифенил +4° С. На фиг. 21 (кривая 2) приведены температуры плавления двойных нафталиновых смесей в зависимости от соотношений компонентов. Там же для сравнения приведена кривая плавления смеси дифенилового эфира с дифенилом (кривая 1).

Таблица 9

Наименование	Размерность	Температура, °С				
		20	100	150	200	250
Удельный вес глицерина	кг/м <sup>3</sup>	1 264	1 220	1 170	1 135	1 097
Теплота парообразования	ккал/кг	—	212	208	198	—
Удельная теплоемкость	ккал/кг °С	—	0,59	0,615	0,67	—
Динамическая вязкость 10 <sup>6</sup>	кгсек/м <sup>2</sup>	63	—	—	—	—
Дополнительные сведения		Температура вспышки 174° С; температура воспламенения 187° С; теплота плавления 47,5 ккал/кг				



Фиг. 21. Температура плавления двойных смесей дифенилового эфира с дифенилом и нафталином.

**Теплоносители Всесоюзного научно-исследовательского института химических реактивов<sup>1</sup>** с химической стороны являются алкильными производными диарилметанов, синтез их несложен и заключается в конденсации исходного углеводорода (толуола, кумола, ксилола, диизопропилбензола и др.) с формальдегидом в присутствии серной кислоты в качестве водоотнимающего средства.

Один из таких теплоносителей ДТМ (диитолилметан), представляющий техническую смесь орто- и пароиомеров, получаемую по конденсации толуола с формальдегидом, кроме испытаний в лаборатории, испытывался в производственной аппаратуре как теплоноситель на заводе пластмассовых изделий. После 5 230 час. работы при темпера-

<sup>1</sup> Настоящий раздел составлен кандидатом технических наук И. Г. Матвеевым, инженером К. В. Вильшау и инженером Д. А. Драпкиной.

туре около 290°С было обнаружено лишь незначительное изменение вязкости и потемнение теплоносителя, повидимому, за счет загрязнений от аппаратуры.

Физические показатели определены для следующих теплоносителей:

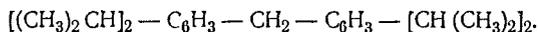
1) ДТМ — дитолилметан или диметилдифенилметан



2) ДКМ — дикумилметан, диизопропилдифенилметан



3) ТБМ — тетраизопропилдифенилметан



Полученные данные приведены в табл. 10.

ДТМ на термостойкость испытывался в промышленной печи при температуре 290—300°С, давлении 1—1,1 *ата*, общей продолжительностью нагревания 5230 час., при этом было обнаружено уменьшение температуры вспышки на 6°С и увеличение вязкости при 20°С на 2 *спз* по сравнению с взятым для испытания образцом. Испытания в эксплуатационных условиях продолжаются.

ДКМ до настоящего времени испытывался на термостойкость в лабораторных условиях в течение 200 час. при непрерывном киплении и конденсации.

Практически заметных изменений физических параметров после указанного испытания не обнаружено.

В лабораторных условиях при помощи ДКМ производились выпарка и получение твердой каустической соды из водного раствора.

Кроме того, ДКМ испытывался продолжительное время как теплоноситель в аппарате для сушки термонзлучением Горьковским политехническим институтом имени А. А. Жданова при температуре 300—350°С.

По сообщению института, какого-либо разложения теплоносителя не обнаружено.

Как видно из произведенных еще неполных характеристик алкиларилметанов, применение их является перспективным для ряда отраслей промышленности (химической, нефтяной, пищевой, электротехнической и др.), особенно для сушки.

На заводе пластмасс Институтом совместно с работниками завода в апреле 1955 г. введена в действие опытная установка для синтеза теплоносителей с производительностью около 15 *т/мес.*

Стоимость теплоносителя любой из указанных марок даже при таком малом выпуске продукта не будет превышать 5—8 тыс. *руб/т*, т. е. примерно в 2,5—3 раза менее стоимости ВОТ.

## б) Теплоотдача

Коэффициенты теплоотдачи к жидкому органическому теплоносителю могут рассчитываться по формулам безразмерного вида [Л. 15].

Вводим следующие обозначения:

$$Nu_n = \frac{\alpha l}{\lambda_n} - \text{критерий Нуссельта};$$

Основные физические показатели	Размерность
Химическая формула . . . . .	
Температура кипения; температура плавления . . . . .	°C
Давление при температуре, °C . . . . . 100 200 300 400	ата
Удельный вес жидкости . . . . .	кг/м <sup>3</sup>
Удельный вес пара . . . . .	м <sup>3</sup> /кг
Теплота парообразования, в среднем . . . . .	ккал/кг
Теплосодержание пара . . . . .	ккал/кг
Теплосодержание жидкости . . . . .	ккал/кг
Теплоемкость . . . . .	ккал/кг
Динамическая вязкость . . . . .	10 <sup>6</sup> кгсек/м <sup>2</sup>

Таблица 10

ДТМ (диэтилметан или диметилдифенилметан)	ДКМ (дикумилметан, диизо- пропилдифенилметан)	ТДМ (тетраизопропил- дифенилметан)
$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2- \\   \\ -\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} (\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_4- \\   \\ -\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4- \\   \\ -\text{CH}(\text{CH}_3)_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} [(\text{CH}_3)_2\text{CH}]_2-\text{C}_6\text{H}_3- \\   \\ -\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_3- \\   \\ -[\text{CH}(\text{CH}_3)_2]_2 \end{array}$
292; —30	336; — 22	384; — 8
77 · 10 <sup>-5</sup>	13 · 10 <sup>-5</sup>	234 · 10 <sup>-5</sup>
0,059	0,019	0,001775
1,02	0,435	0,128
6,9	4,15	2,690
895,4	896,2	873,6
0,00493	0,00107	0,0000257
76,3	68,5	68,6
128	112	—
52	44	—
0,425	0,385	0,350
71,5	91,7	—

$$Gr_n = \beta \frac{gl^3}{\nu_n^2} \Delta t \text{ — критерий Грасгофа;}$$

$$Pr_n = 3600 \frac{g \mu_n c_p}{\lambda_n} \text{ — критерий Прандтля;}$$

$$Re_n = \frac{wd}{\nu_{cm}} \text{ — критерий Рейнольдса;}$$

$$Ga_{cm} = \frac{gH^3}{\nu_{cm}^2} \text{ — критерий Галилея;}$$

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$ ;

$$\beta = \frac{\rho_{cm} - \rho_{ж}}{\rho_{cm} - \Delta t} \text{ — коэффициент объемного расширения;}$$

$g$  — ускорение силы тяжести,  $\text{м/сек}^2$ ;

$\Delta t = t_{cm} - t_{ж}$  — температурный напор,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{cm}$  — температура стенки,  $^\circ\text{C}$ ;

$t$  — температура жидкости на достаточно большом расстоянии от стенки,  $^\circ\text{C}$ ;

$\rho_{cm}$  и  $\rho_{ж}$  — соответственно плотность жидкости при температуре стенки  $t_{cm}$  или жидкости  $t_{ж}$ ,  $\text{кг сек}^2/\text{м}^4$ ;

$l$  — линейный размер,  $\text{м}$ ;

$d$  — наружный или внутренний диаметр трубы,  $\text{м}$ ;

$d_o$  — отрывной диаметр первого пузыря;

$H$  — длина трубы,  $\text{м}$ ;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности жидкости,  $\text{ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}$ ;

$c_p$  — истинная теплоемкость жидкости,  $\text{ккал/кг } ^\circ\text{C}$ ;

$\gamma_n$  и  $\gamma'_n$  — удельный вес соответственно жидкости и пара,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\mu$  — динамическая вязкость жидкости,  $\text{кг сек/м}^2$ ;

$\nu$  — кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{сек}$ ;

$r$  — теплота парообразования при давлении насыщения,  $\text{ккал/кг}$ ;

$w$  — скорость в трубе (канале),  $\text{м/сек}$ ;

$\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\text{кг/м}$ ;

$$K_{ж} = \frac{q}{\gamma'' r 280 \left( \frac{\gamma_o}{\gamma''} \right)^{1,1}};$$

$\gamma_o$  — удельный вес пара при I ата,  $\text{кг/м}^3$ ;

$p$  — абсолютное давление,  $\text{кг/м}^2$ .

Индексы  $n$ ,  $cm$  и  $ж$  означают, что константы вычисляются при температуре пограничного слоя, стенки или жидкости.

Теплоотдача при свободном движении в неограниченном пространстве:

$$Nu_n = c (Gr_n Pr_n)^m; \quad (2)$$

$$c = 0,54, \quad m = 1/4 \quad \text{при } Gr_n Pr_n = 5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7;$$

$$c = 0,135, \quad m = 1/3 \quad \text{при } Gr_n Pr_n = 2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{13}.$$

Значение физических констант, входящих в критерии, принимают при температуре  $t_{см} = 0,5(t_{ст} + t)$ .

Теплоотдача при вынужденном ламинарном движении по трубам и каналам при  $Re_n < 2200$ :

$$Nu_n = 0,74 Re_n^{0,2} (Gr_n Pr_n)^{0,1} Pr_n^{0,2}, \quad (3)$$

или

$$\alpha = B_1 \frac{w^{0,2} \Delta t^{0,1}}{d^{0,5}}, \quad (3a)$$

где

$$B_1 = 8,63 \lambda^{0,7} c_p^{0,3} \nu_n^{0,4} \left( \frac{\beta_n}{\mu_n} \right)^{0,1};$$

$d$  — внутренний диаметр трубы, м.

Для каналов некруглого сечения вместо  $d$  подставляется

$$d_{экв} = \frac{4F}{\nu} [м],$$

где  $F$  — площадь сечения,  $м^2$ ,  $\nu$  — омываемый периметр, м.

Для коротких труб, если  $\frac{l}{d} < 50$ , значения коэффициентов теплоотдачи, вычисленные по формулам (3) или (3a), следует умножить на поправочный коэффициент  $k_e$

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$k_e$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

Для вертикальных труб при совпадении направлений свободного и вынужденного движений  $\alpha$  следует уменьшить на 15% по сравнению с вычисленным по формуле (3), а в случае противоположных движений — увеличить на 15%.

Теплоотдача при вынужденном турбулентном движении по трубам и каналам при  $Re > 10000$ .

$$Nu_{жс} = 0,023 Re_{жс}^{0,8} Pr_{жс}^{0,4}, \quad (4)$$

или

$$\alpha = B_2 \frac{w^{0,8}}{d^{0,2}}, \quad (4a)$$

где

$$B_2 = 0,0244 \lambda_{жс}^{0,6} \left( \frac{\gamma_{жс}^2 c_p}{\mu_{жс}} \right).$$

Для коротких труб при  $\frac{l}{d} < 50$  значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$ , вычисленные по формулам (4) или (4a), следует умножить на поправочный коэффициент.

Для переходных режимов ( $2\,200 < Re < 10\,000$ ) подсчет можно производить по формуле (4) с введением поправочного коэффициента

$$k_R = f(Re)$$

$Re = 2\,300$	$3\,000$	$4\,000$	$5\,000$	$6\,000$	$7\,000$	$8\,000$
$k_R = 0,45$	$0,66$	$0,82$	$0,88$	$0,93$	$0,96$	$0,99$

Теплоотдача при поперечном обтекании пучка труб для коридорного расположения

$$Nu_{жс} = 0,157cRe_{жс}^{0,65}Pr_{жс}^{0,4}, \quad (5)$$

$$\alpha = B_3 \frac{c\omega^{0,65}}{d^{0,35}}, \quad (5a)$$

где

$$B_3 = \frac{0,157\lambda_{жс}Pr_{жс}^{0,4}}{\nu_{жс}^{0,65}};$$

$$c = 1 + 0,1 \frac{s_1}{d} \leq 1,3,$$

$s_1$  — поперечный шаг между трубами;

$d$  — наружный диаметр труб.

Для шахматного расположения труб

$$Nu_{жс} = 0,29cRe_{жс}^{0,6}Pr_{жс}^{0,8}, \quad (6)$$

или

$$\alpha = B_4 \frac{c\omega^{0,6}}{d^{0,4}}, \quad (6a)$$

где

$$B_4 = \frac{0,29\lambda_{жс}Pr_{жс}^{0,4}}{\nu_{жс}^{0,6}}.$$

Теплообмен при кипении органических теплоносителей.

В расчетах теплообмена имеют значение две величины:

1) коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  и

2) максимальный  $q_{макс}$ , или, как его называют, критический  $q_{кр}$  тепловой поток, при превышении которого происходит изменение режима кипения с пузырькового на пленочный с одновременным резким уменьшением величины коэффициента теплоотдачи [Л. 16, 17].

Экспериментальные данные по коэффициентам теплоотдачи при кипении органических теплоносителей крайне ограничены и недостаточно надежны. Опытных данных по  $q_{макс}$  также очень мало.

Для приближенных расчетов могут быть рекомендованы приводимые ниже формулы.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении формула, предложенная В. И. Тотбунским [Л. 18]

$$Nu'_{жс} = 54K_{жс}^{0,6}Pr_{жс}^{-0,3} \quad (7)$$

$$Nu'_{жс} = \frac{\alpha_k}{\lambda} \sqrt{\frac{c}{\gamma}}$$

и предложенная М. А. Книгиным и Н Ю. Тобилевичем [Л. 19].

$$\alpha_k = 3,25 \cdot 10^{-4} \frac{g^{0,125} \lambda^{0,4} c_p^{0,6} \rho^{0,267} r^{0,7}}{r^{0,6} \gamma^{0,6} \gamma''^{0,25} \sigma^{0,363}} q^{0,6}. \quad (8)$$

Для расчета максимального теплового потока  $q_{\max}$  ( $q_{kp}$ ) рекомендуется формула, предложенная С. С. Кутателадзе [Л. 20].

$$q_{kp1} = 1800r \sqrt{\gamma''} \sqrt[3]{\sigma (\gamma - \gamma'')} \quad [\text{ккал/м}^2 \text{ час}] \quad (9)$$

и формула, предложенная С. М. Лукомским [Л. 16]

$$q_{\max} = 5r^{0,8} \gamma_{жс} \quad [\text{ккал/м}^2 \text{ час}]. \quad (10)$$

Формула (10) может применяться только при атмосферном давлении. Имеются единичные опытные данные по определению максимального теплового потока  $q_{\max}$  для глицерина и дифенильной смеси при атмосферном давлении.

Для глицерина

$$q_{\max} = 1 \cdot 10^6 - 1,2 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}.$$

Для дифенильной смеси

$$q_{\max} = 0,3 \cdot 10^6 - 0,32 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}.$$

О теплоотдаче при расслоенном движении органических теплоносителей

Опыты, проведенные в ЭНИН АН СССР [Л. 21] на полупромышленной установке с горизонтальной трубой, показали, что в ряде режимов имеет место, так же как на воде, расслоенное лотковое движение, при котором температура верхней образующей резко повышается за счет ухудшения теплоотдачи (в верхней части трубы движется пар с небольшим количеством жидкости в виде капель) и происходит коксообразование. В связи с указанным до проведения всесторонних исследований для огневого и электрического обогрева горизонтальные трубы не могут быть рекомендованы.

Теплоотдача при конденсации органических теплоносителей

Для конденсации на поверхности одиночной горизонтальной трубы коэффициенты теплопередачи определяются по формуле

$$\alpha_{кон} = 0,72 \sqrt{\frac{3600 \lambda_{жн}^3 \mu_n^2 r}{\mu_n \Delta t d_n}}. \quad (11)$$

При числе труб больше единицы коэффициент теплоотдачи несколько снижается и при 20 рядах доходит до 60—70% от значения, подсчитанного по формуле (11).

При конденсации паров на поверхности вертикальной трубы могут быть рекомендованы следующие формулы [Л. 3]

$$Nu_{cm} = 8,8 \cdot 10^{-5} Re_{cm}^{0,843} G a_{cm}^{1/3} Pr_{cm} \quad (12)$$

или

$$\alpha_{кон} = 0,213 \cdot 10^{-3} \frac{c_p \gamma_{cm}^{0,667}}{\mu_{cm}^{0,51}} \left( \frac{qH}{r} \right)^{0,843}. \quad (12a)$$

Формулы действительны в пределах  $1,8 < Re < 3\,500$  и  $4 < Pr < 45$ , где

$$Nu_{cm} = \frac{\alpha_{кон} H}{\lambda_{cm}}, \quad Re = \frac{qH}{3\,600 \cdot r_{cm} g},$$

$$Pr_{cm} = \frac{3\,600 c_p r_{cm} g}{\lambda_{cm}}, \quad Ga_{cm} = \frac{gH^3}{\nu_{cm}^2}.$$

### в) Гидравлические сопротивления систем

Расчет гидравлических сопротивлений систем с органическим теплоносителем может быть осуществлен по обычным применяемым для воды формулам [Л. 21, 22], с подстановкой соответствующих физических констант.

Расчет полезных напоров циркуляционных контуров, работающих на органическом теплоносителе при давлениях 2 ата, можно производить без учета относительной скорости пара, т. е. по теоретическим формулам

$$N_{пол} = \gamma' - \frac{w'_{np} \gamma'' + w'_{np} \gamma}{w'_{np} + w'_{np}} \quad [кг/м^2], \quad (13)$$

где  $N'_{пол}$  — полезный напор, кг/м<sup>2</sup>,

$w'_{np}$  — приведенная (ко всему сечению трубы) скорость пара, м/сек;

$w'_{np}$  — приведенная (ко всему сечению трубы) скорость жидкости, м/сек.

При рабочих давлениях от 1 до 2 ата следует уменьшать на 15% полезные напоры, подсчитанные по формуле (13).

## 2. Неорганические теплоносители

### а) Физико-химические свойства расплавленных солей (РС) нитритов и нитратов [Л. 23—26]

Все компоненты сплава РС производятся в СССР в больших количествах. РС представляет собой смесь расплавленных неорганических солей следующего состава: по весу 53% азотнокислого калия (KNO<sub>3</sub>), 7% азотнокислого натрия (NaNO<sub>3</sub>) и 40% азотнокислого натрия NaNO<sub>2</sub>.

Сплав РС, составленный из химически чистых продуктов, при комнатной температуре белая аморфная масса, а при температуре 200°С — жидкость светлорыжевого цвета. Указанная смесь имеет температуру кипения > 1 000°С и температуру плавления 140—150°С. РС не горит, но поддерживает горение. В связи с этим должны приниматься меры, исключающие попадание горючих материалов в нагретую до высокой температуры смесь РС.

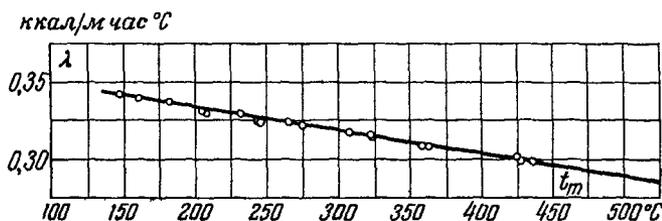
Результаты опытов, проведенных ЦНИИПО МВД СССР совместно с ЭНИН АН СССР [Л. 23], показали взрывобезопасность РС при попадании их на раскаленную обмуровку топки, отапливаемой угольной пылью или жидким топливом, при температурах расплава до 640°С.

ЦНИИПО МВД СССР и ЭНИН АН СССР рекомендовали с точки зрения взрывобезопасности применение РС в качестве теплоносителя для бинарных котлов, нагреваемых голым огнем, и тому подобных теплообменников с рабочей температурой теплоносителя до 550°С.

Возможность применения РС с рабочей температурой > 550°С в настоящее время исследуется.

Упомянутыми выше исследованиями также установлено, что нагретая до 800°С расплавленная смесь РС вступает в реакцию с углеродистой сталью стенок сосуда, в котором идет нагревание. При этом происходит бурное выделение продуктов разложения и большого количества тепла, поднимающего температуру металла выше его температуры плавления. Реакция происходит без взрыва или хлопков.

Сплав РС по эксплуатационным данным термически вполне устойчив до 500°С. Имеются сведения, что при работе более 5 лет с рабочей температурой 450°С сплав не требует регенерации.



Фиг. 22. Теплопроводность жидкой массы РС в зависимости от температуры жидкости (по Н. Б. Варгафтику).

По некоторым данным [Л. 24] сплав РС вполне стоек до температур 427°С. При более высоких температурах (порядка 590°С) сплав РС подвергается слабому разложению, причем разложение сопровождается непрерывным ростом температуры плавления. Продуктом разложения на 98% является азот. При доступе воздуха к расплавленным солям при высоких температурах имеют место дополнительные реакции. В связи с этим желательно иметь герметическую систему с подушкой из инертных газов.

Коррозионное воздействие сплава РС на различные металлы при температурах 452—593°С характеризуется следующими цифрами [Л. 24]:

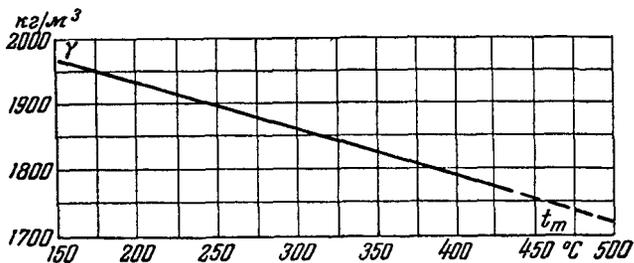
углеродистая сталь при  $t = 454^\circ\text{C}$  — 0,09 мм/год, а при  $t = 594^\circ\text{C}$  — 3 мм/год,

стали с добавкой 8—18% хромо-никеля или молибдена при  $t = 538^\circ\text{C}$  — полное отсутствие коррозии, медь при  $t = 538^\circ\text{C}$  — 1 мм/год.

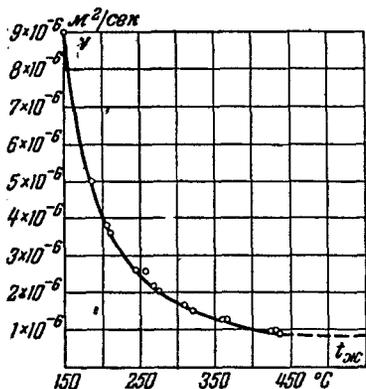
Таким образом, при рабочих температурах теплоносителя до 450°С можно применять углеродистые стали, а при температурах > 450°С — специальные сплавы. Сплав РС не токсичен и не имеет запаха. Стойкость сплава РС около 3 руб. за 1 кг.

Сплав РС весьма гигроскопичен и при хранении на воздухе содержит до 3% влаги.

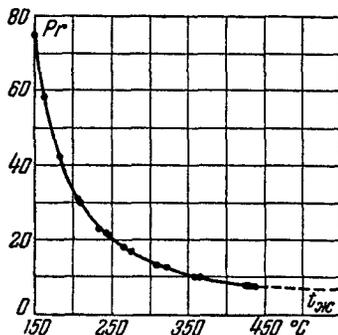
РС электропроводен и при пропускании тока разлагается с обильным выделением пузырьков газа. Другие данные, необходимые для расчетов, представлены в виде графиков (фиг. 22—25).



Фиг. 23. Удельный вес жидкой РС в зависимости от температуры жидкости.



Фиг. 24. Кинематическая вязкость жидкой РС в зависимости от температуры жидкости.



Фиг. 25. Критерий  $Pr$  для жидкой РС в функции температуры.

## б) Теплопередача и гидравлические сопротивления

Как показали исследования, проведенные в ЭНИН АН СССР, для расчета коэффициентов теплоотдачи теплоносителя РС при вынужденном турбулентном движении в трубах может быть использована общепринятая формула безразмерного вида:

$$Nu_{жс} = 0,025 Re_{жс}^{0,8} Pr_{жс}^{0,4} \quad (14)$$

и в развернутом виде:

$$\alpha_{pc} = 0,025 \frac{\lambda_{жс}}{d} \left( \frac{w d}{\nu_{жс}} \right)^{0,8} \left( \frac{\gamma_{жс}^c p \nu_{жс}}{\lambda_{жс}} 3600 \right)^{0,4}. \quad (14a)$$

Следует иметь в виду, что в формулах (14) и (14a) все физические параметры вычисляются по средней температуре жидкости

Ориентировочные расчеты коэффициентов теплоотдачи теплоносителя РС для других случаев теплообмена ввиду отсутствия экспериментальных данных могут производиться по формулам, приведенным выше для органических теплоносителей.

Экспериментальные исследования по гидравлическим сопротивлениям теплоносителя РС отсутствуют.

Для приближенных расчетов могут использоваться общепринятые формулы безразмерного вида при подстановке соответствующих физических констант.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 А. М. Ластовцев, Экспериментальное изучение системы обогрева органическими теплоносителями, вып I и II.
- 2 А. М. Ластовцев, Химическое машиностроение, 1936, № 3.
- 3 С. З. Каган и А. В. Чечеткин, Органические высокотемпературные теплоносители, Госхимиздат, 1951.
- 4 Информационное письмо № 1/19, Высокотемпературный органический теплоноситель и его применение в промышленной теплотехнике, 1949.
- 5 Хроника. Постановление Технического совета Министерства электростанций СССР, «Электрические станции», 1946, № 1—2
- 6 Информационное письмо № 3/23, Парообразовательные установки для промышленных котельных с применением высококипящего теплоносителя, 1951.
- 7 А. Б. Гатеев, Глицерин как жидкостный теплоноситель, «Известия ВТИ», 1950, № 10.
- 8 А. Б. Гатеев, Использование глицерина в качестве теплоносителя для сушки обмоток электромоторов, «Промышленная энергетика», 1952, № 3.
- 9 M. V. Sullivan, J. R. Wolfe and N. A. Zisman, Ind. and Eng. Chem., vol. 39, № 12, 1947.
- 10 Mc Ardle, G. C. Garrett and P. Benignus, Ind., and Eng. Chem., vol. 41, № 7, 1949.
- 11 Новости техники, 1947, № 2, 13.
- 12 Mechanical Engineering, vol. 68, № 5, 1946.
- 13 O. Oars, Heating, Piping and Air Conditioning, vol. 18, 1946.
- 14 Г. Фрайтаг, Материалы для изготовления химической аппаратуры, ОНТИ, Госхимиздат, 1934
- 15 М. А. Михеев, Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1949.
- 16 С. М. Лукомский, Методика относительного расчета теплоотдачи при кипении, «Химическая промышленность», 1944, № 6
- 17 С. М. Лукомский, О теплообмене при кипении углекислоты в трубах под высоким давлением, Изв АН СССР.

18 В. И. Толубинский, Сообщение Киевского политехнического ин-та, т VI, 1947.

19. М. А. Кичигин, Вопросы рационализации теплового хозяйства промышленных предприятий, Гостехиздат УССР, 1953.

20. С. С. Кутателадзе, Теплопередача при конденсации и кипении, Машгиз, 1952.

21. Ф. Ф. Богданов, Исследование естественной циркуляции высококипящего органического теплоносителя, Изв. АН СССР ОТН, 1950, № 3

22 ЦКТИ, Нормы расчета циркуляции воды в паровых котлах, Машгиз, 1950

23. М. А. Стырикович и др, О возможности применения нитритов и нитратов в качестве теплоносителя при высоких температурах, «Теплоэнергетика», 1954, № 11.

24. В. Е. Керст, В. И. Нейтель и др, Transactions of the American Institute Chem. Eng., vol. XXXVI, 1940.

25 G. R. Alexander and S. A. Hindin, Ind. and Eng. Chem. vol. 39, № 8, 1941.

26. Воскресенская, Янковская и Аносов, Журнал прикладной химии, 1948, т. XXI, вып. 1.

---

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	2
I. Выбор высокотемпературных теплоносителей . . . . .	3
II. Лабораторные и полупромышленные установки на органическом теплоносителе . . . . .	7
III. Лабораторные установки на неорганическом теплоносителе . . . . .	12
IV. Бинарные котлы по схеме ЭНИН АН СССР на дифениле и дифенильной смеси . . . . .	14
V. Промышленные технологические установки с обогревом дифенильной смесью . . . . .	23
VI Промышленные технологические установки с масляным обогревом . . . . .	34
VII. Установки с обогревом глицерином . . . . .	37
VIII. Основные данные по применяемым высокотемпературным теплоносителям . . . . .	42

Редактор *И. Л. Иглицын*

Технич редактор *И. М Скворцов*

\* \* \*

Сдано в набор 21/II 1956 г

Подписано к печати 24/V 1956 г.

Бумага 82×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>

Объем 2,87 п л

Уч -нзд л. 4,7

T-05707

Тираж 5 000 экз

Цена 2 р 35 к

Заказ 1122

---

Типография Госэнергониздата Москва, Шлюзовая наб , 10

### ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
11	Табл. 4, 1 графа справа,	380	258
54	24 снизу	1946,	1945,

Информационное письмо № 3/20