

6
781

1972

ДЕП

2003

**ПРОБЛЕМЫ
ЭНЕРГЕТИКИ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**СБОРНИК СТАТЕЙ
ПОД РЕД. ПРОФ.
В. В. ДМИТРИЕВА**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
1927**

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО РСФСР
Москва — Ленинград

П. ЛАПИНСКИЙ

МИРОВОЙ КРИЗИС УГЛЯ

Итоги и перспективы

С предисловием К. Радека

Стр. 42.

Ц. 20 к.

К. Н. МУРЗАНОВ

НЕФТЬ И УГОЛЬ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ СССР

Под редакцией и с предисловием Г. И. Ломова

Стр. 84.

Ц. 90 к.

ТЯЖЕЛАЯ ИНДУСТРИЯ В СССР

Уголь, нефть, железо и медь

Сборник статей проф. А. Д. Брейгермана, проф. А. В. Венедиктова,
доц. М. Б. Вольфа, проф. В. Э. Дена и В. С. Клаута

Под общей редакцией проф. В. Э. Дена

Стр. 3

Ц. 3 р. 50 к.

ПР

ДАТА

BT



1972

Handwritten scribbles and numbers at the top right.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ЛЕНИНГРАДСКОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА И ЭЛЕКТРОМЕХАНИ-
ЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

17.781

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

СБОРНИК СТАТЕЙ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ,
ТЕПЛОТЕХНИКЕ И ГИДРОТЕХНИКЕ

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ
ПРОФ. В. В. ДМИТРИЕВА

УДК 621.117.

1282203



РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1927 ЛЕНИНГРАД



Гла № 18168/л.
Ленинградский Гублит № 35732,
10³/₄ л. Тираж 3000.

СОДЕРЖАНИЕ.

ОТ РЕДАКЦИИ	5
Проф. В. В. Дмитриев. — Современные достижения в области энергетического хозяйства в производствах с большим расходом тепла на единицу обрабатываемого продукта	7
Проф. Я. М. Гаккель и инж. Н. Т. Матвеев. — Проблема тепловоза . . .	30
Инж. Р. А. Лютер. — Надежность работы и современные защитные устройства для генераторов от токов короткого замыкания	51
Инж. А. В. Лавров. — Гидравлические турбины высокой быстроходности в американской практике	66
В. Т. Касьянов. — Ассинхронные генераторы трехфазного тока и их применение	94
Инж. М. В. Соколов. — Расход энергии в электрических лампах различных систем (к вопросу об освещении фабрик и заводов)	106
Инж. Г. Т. Третьяк. — О векторных диаграммах в трехфазном токе . . .	131
Инж. В. С. Кевлич. — Опыт переоборудования котельной ЦЭС города Архангельска при переходе с угля на торф и древесные отбросы . .	158

ОТ РЕДАКЦИИ

Наша энергетическая литература никогда не была особенно богатой.

Масса чрезвычайно важных жизненных вопросов не освещались только потому, что не было соответствующих журналов и сборников.

Это особенно сказывается в настоящее время, когда электрификация и целый ряд других вопросов государственного строительства породили необычайное богатство творческой мысли.

Специалисты - производственники и коммунальные техники испытывают в настоящее время особо острую потребность в новых знаниях и ознакомлении с новыми путями реорганизации и эксплуатации обслуживаемых ими предприятий.

Учитывая эти обстоятельства, Научно-Технические Организации Ленинградского Электротехнического Института и Электро-Мех. Фак. Политехнического Института взяли на себя инициативу издания сборника, ставящего своей задачей пополнение технических знаний широких кругов инженеров и техников и ознакомление их с последними достижениями в различных областях научно-технической мысли. Не являясь популярным в обычном понимании этого слова, сборник дает изложение статей, доступное для читателей с техническим образованием, подобно тому, как это делается в наиболее распространенных иностранных технических журналах.

Редакционный Комитет.

ПРИНЯТЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.

<i>A</i>	— ампер.
<i>V</i>	— вольт.
<i>W</i>	— ватт.
<i>F</i>	— фарада.
<i>H</i>	— генри.
Ω	— ом.
<i>C</i>	— кулон.
<i>kW</i>	— киловатт.
<i>kVA</i>	— киловольт-ампер.
<i>kWh</i>	— киловатт-час.
<i>mm</i>	— миллиметр.
<i>cm</i>	— сантиметр.
<i>m</i>	— метр.
<i>km</i>	— километр.
<i>l</i>	— литр.
<i>kg</i>	— килограмм.
<i>t</i>	— тонна.
<i>kgm</i>	— килограммометр.
<i>HP</i>	— лошадиная сила.

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ХОЗЯЙСТВА В ПРОИЗВОДСТВАХ С БОЛЬШИМ РАСХОДОМ ТЕПЛА НА ЕДИНИЦУ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ПРОДУКТА.

Проф. В. В. Дмитриев.

I.

Инженеру-энергетику, к каковым мы причисляем не только инженер-электриков, специализировавшихся в области энергетического электрического хозяйства, но и всех инженеров и техников, ведущих тепловое и электрическое хозяйство на любом производстве, напр., заводских механиков, заведующих котельными и электрическими станциями, заведующих электро-механическими цехами и т. д., весьма часто приходится решать вопросы об улучшении производства не только с точки зрения технической и организационной, но и с точки зрения его экономики, так как нажим государства в сторону экономного расходования топлива на единицу продукта становится все сильнее и сильнее, и не только у нас в СССР, но и в любых государствах Европы и Америки.

Такой нажим вызван топливным кризисом, с одной стороны, и тревогой за топливные ресурсы наших недр, которые при непрерывном росте промышленности и механизации быта вовсе не так велики, чтобы проходить легкомысленно мимо этого главного вопроса общей экономики.

Рост мощных термических и гидроэлектрических центральных основан именно на этом нажиме экономики, так как снижается удельный расход топлива, точнее, числа калорий теплотворной способности топлива на $1 kWh$, в силу весьма значительных достижений в сооружении гигантских котлов и турбин, с одной стороны,

и рациональным комбинированием их — с другой, с применением таких циклов, которые обуславливают почти постоянный баланс тепла при изменении коэффициента загрузки станции.

Борьба мощных централей идет не только в сторону захвата новых абонентов (осветительных, электромоторных, бытовой нагрузки и т. п.), но и в сторону уничтожения небольших сепаратно работающих энергетических установок при разных производствах городских, районных и сельско-хозяйственных поселений; энергетическая экономика последних не высока, иногда чудовищно низка, и их аннулирование, казалось бы, являлось бы рациональным с точки зрения планового энергетического хозяйства районов и государства.

Однако дело обстоит значительно сложнее, чем это кажется на первый взгляд; энергетика производства состоит не из одного силового (и осветительного) хозяйства, она почти всегда сопровождается тепловыми процессами, и не только для целей отопления фабрично-заводских зданий, а и для производственных, обрабатывающих процессов.

Эти последние (вместе с отопительно-тепловыми) по расходу калорий на ед. продукта настолько выше силовых и осветительных, за немногими исключениями, что первоочередными следует признать именно их, а не энергетическо-силовые.

Тепловое хозяйство городских поселений, с весьма высоко-развитой механизацией быта горожан, также измеряется в 2—3 десятка раз большим расходом топлива, чем на трамвай, водопровод, освещение, лифты, вентиляцию и т. п.; а ведь город есть также обширное, многосложное, и все же производственное предприятие.

Источником производственного тепла (отопительного также) являются всевозможные виды топлива, сжигаемые в паровых и водогрейных котлах, средний коэф. полезного действия которых оставляет желать значительного улучшения. Конечно, мы говорим не о „парадных“ к. п. д. котлов во время испытаний, а о „годовых“ средних к. п. д., с которыми тепловая экономика только и может считаться, как с реальным фактом.

В этой статье вопроса об улучшении этой поистине „вопнящей“ картины выпуска на воздух десятков и сотен миллионов пудов топлива мы касаться не будем, т. к. вопрос этот есть вопрос влияния нескольких переменных, главные из которых: неудовлетворительные топки к хорошим иногда котлам; низкий уровень подготовки

кочегаров, которых принято почему-то считать самым низким по квалификации техническим персоналом и оплачивать их по самым низким тарифам, не предъявляя к ним, конечно, и никаких требований; полное отсутствие или недостаточный в лучшем случае учет расхода топлива на ед. производимого „производственного“ тепла (пара, воды); плохая тяга и форсировка котла при химической неполноте сгорания и т. д.

Средний уровень к. п. д. котельных во всяком случае надо считать не выше 60—65% для производственных установок и 70—75% для специальных энергетических производств средней мощности.

Конечно, с Центр. Электрическими Станциями и даже большой мощности со средним расходом *cal./kWh*

порядка 7500—10000 *cal./kWh*. (для средних)
и 5000—7000 „ „ (для крупных)

очень легка борьба дизель-моторных эл. станций со средним расходом порядка 3000—3500 *cal./kWh*, но употребляемое топливо для них (сырая натуральная нефть) является, во-первых, очень дорогим топливом, и, во-вторых, употребление ее связано с сжиганием неотогнанного бензина и керосина, весьма ценных и дорогих с государственной точки зрения продуктов.

Однако ныне вопрос этот не является острым, так как американская практика доказала возможность работы дизель-моторов на нефтяных остатках (мазуте), при чем во избежание загрязнения клапанов и цилиндров употребляется очень простое средство: „пуск в ход совершается на сырой нефти или керосине, по полном разогреве и получении нагрузки переходят на тяжелые сорта жидкого топлива, а за 10—15 мин. до остановки и разгрузки повторяют ту же операцию перехода на легкое топливо, разгружают и производят остановку“. Это правило показывает, что загрязнение тяжелыми смолами и нагарами происходит не во время работы двигателя с нагрузкой, а лишь в начале и конце, когда температура вспышки и, следовательно, средняя температура процесса понижается.

Было бы очень не трудно доказать, что для СССР, так же как и Америки, постепенный переход небольших и др. электрических станций на дизель-моторы понизил бы общий расход топлива на весьма солидную величину, в особенности при переходе на работу нефтяными остатками. Америка в этом отношении достигает уже

солидного строительства дизель-моторов и по количеству, и по величине, и энергично переоборудывает свои блок-станции в городах и на производствах, где расход производственного тепла очень мал в сравнении с требующейся силовой (и осветительной) энергией.

Вторым достижением стремлений тепловой экономики надо считать энергичное переоборудование энергетических хозяйств в тех производствах, где расход производственного тепла вообще достаточно значителен по сравнению с силовой энергией; хотя системы переоборудований по существу не новы, но достижения техники в области высоких давлений пара, с одной стороны, и найденные практические способы аккумуляирования пара — с другой, дали мощный толчок именно этим, весьма простым, дешевым в оборудовании и удобным в эксплуатации, „старым“ системам, сделав их поистине экономичными и технически изящными.

Мы говорим о паротурбинных установках с противодавлением, где весь отработанный пар расходуется полезно в производственных тепловых процессах, и, конечно, и на отопление, а полученная электрическая энергия производится за счет затраты калорий порядка 1350—1650 на kWh , побивая экономичностью и дешевизною ед. эл. энергии самые мощные энергетические установки и притом не только термические, но и гидроэлектрические с высоким коэффициентом использования установленного kW своей мощности.

Причина, почему именно высокие давления (и отчасти перегревы пара) позволили положить начало развитию именно таких установок в значительно расширенной области различных производств, будут легко поняты из краткой теории расчета такой установки, легко усвояемой читателем.

Для облегчения напомним, что потребности в различного вида тепловой и силовой энергии дают возможность расположить все типичные производства в особом, с точки зрения энергетики, порядке, т. к. в настоящее время, за очень немногим исключением, производственные процессы достаточно оформились и подошли к некоторым нормам расхода тепла и силы на ед. продукта, изменение которых хотя и идет в сторону некоторого снижения, но настолько уже медленно, что эти нормы могут быть свободно принимаемы за базис энергетического оборудования производства, конечно, с необходимыми запасами как в области расхода тепла, так и энергии на ед. фабриката.

Я воспользуюсь, правда, очень несовершенной, таблицей инженера Oelschläger'a с его энергетической группировкой производств, из которых для нас интересна группа II и III.

Из этой таблицы ясно, что если потребность производственного тепла равна — „ j_0 “ cal. на 1 kg готового продукта (в виде пара определенного давления $p_0 \frac{kg}{cm^2}$ и температуры t_0 C, т. к. к нему всегда можно свести пар более низкого давления и температуры или горячей воды любой температуры), а потребность в силовой энергии (включая освещение) равна „ μ_0 “ на 1 kg того же продукта, то $\frac{j_0}{\mu_0}$ представляет определенное число в cal./kWh, которое будет характеризовать производство с энергетической точки зрения.

На практике удобнее однако пользоваться не количеством кал. на ед. продукта „ j_0 “, а количеством kg пара „ q_0 “, приведенного к теплосодержанию:

$$\lambda_0 = 606,5 - 0,7 \cdot t_s + C_u (t_0 - t_s) \text{ cal./kg пара,}$$

где „ t_s “ есть температура насыщенного пара давления „ $p_0 \frac{kg}{cm^2}$ “, C_u — теплоемкость перегретого до температуры „ t_0 “ пара, а

$$- 0,7 \cdot t_s = 0,305 \cdot t_s - t_s,$$

считая, что пар отдает при производстве тепла свою скрытую теплоту испарения, конденсируясь в воду температурою „ t_s “; вообще же правильнее принимать температуру конденсата (из конденсационных горшков) не „ t_s “, а кругло 100°C, так как конденсат, попадая из конденсационного горшка в конденсационный трубопровод, при атмосферном давлении, немедленно из перегретого состояния при атм. давлении превращается в насыщенное состояние при 100°C, за счет некоторого испарения, теряемого для производства.

Ясно, что, пересчитывая на количество пара, получим расход его на ед. продукта:

$$q_0 = \frac{j_0}{\lambda_0} \text{ kg}$$

и тогда отношение

$$\frac{q_0}{\mu_0} = \omega$$

можно было бы удобно называть коэффициентом энергетической пропорциональности данного производства, или просто КЭП для сокращения.

Чтобы понять причины считать КЭП важным с точки зрения комбинирования энергетического хозяйства, обратимся к известной техникам-энергетикам диаграмме *Mollier*, уголок которой построен на фиг. 1.¹ Пусть, напр., точка *C* характеризует задаваемое нам производственниками состояние пара, требуемое в производстве по давлению и температуре; точка *C'* определяет температуру в состоянии его насыщения на пограничной кривой, под которой он должен в большинстве случаев практики подойти к приборам, утилизирующим его скрытую теплоту испарения; таким образом перегрев пара в точке *C* против *C'* обусловлен потерями тепла по пути распределения и определяется расчетом паропроводов по охлаждению (см. Расчет паропроводов ЦЭС 1915 г. В. В. Дмитриева).

При раздельном хозяйстве 1 *kg* пара состояния *C* доставлялся бы или из котельной низкого давления (опять-таки с небольшим запасом на падение давления в паропроводе), либо из котельной повышенного давления, но через редуктор давления, путем процесса мятя пара.

Такой процесс изображался бы прямой почти практически параллельной оси энтропий, т.е., наприм., линией *D'C*, при чем ясно, что давление пара *p'* определяется пересечением *D'C* с пограничной кривой, и он будет сухой насыщенный; в процессе мятя, т.е. при $i' = const.$, он будет перегреваться, понижая давление, но не производя никакой работы.

При таком раздельном хозяйстве силовая энергия получалась бы от какого-либо, предположим, парового двигателя, который получал бы пар из той же котельной при состоянии его в точке *D'* и расширяясь адиабатически (если машина работает без потерь) по прямой *D'K* до давления в конденсаторе (на чертеже не показанном), если она снабжена последним, или до давления в 1 *kg/cm² abs.*, если она работает на „выхлоп“.

Предположим для простоты последний случай; тогда конечная точка адиабатического расширения будет как раз *K'*; но так как машина несовершенна и внутренние потери ее на всевозможные мятя при переходе пара в органах машины обязательно существуют, то процесс будет состоять из некоторой адиабаты *D'K''* и некоторой прямой мятя *K''C''*, которой суммарно мы заменяем отдельные процессы мятя в различных органах машины.

¹ Вследствие уменьшения при клишировании масштаб диаграммы изменен на 156 *mm* = 200 *cal*.

Чтобы понять причины считать КЭП важным с точки зрения комбинирования энергетического хозяйства, обратимся к известной техникам-энергетикам диаграмме *Mollier*, уголок которой построен на фиг. 1.¹ Пусть, напр., точка *C* характеризует задаваемое нам производственниками состояние пара, требуемое в производстве по давлению и температуре; точка *C'* определяет температуру в состоянии его насыщения на пограничной кривой, под которой он должен в большинстве случаев практики подойти к приборам, утилизирующим его скрытую теплоту испарения; таким образом перегрев пара в точке *C* против *C'* обусловлен потерями тепла по пути распределения и определяется расчетом паропроводов по охлаждению (см. Расчет паропроводов ЦЭС 1915 г. В. В. Дмитриева).

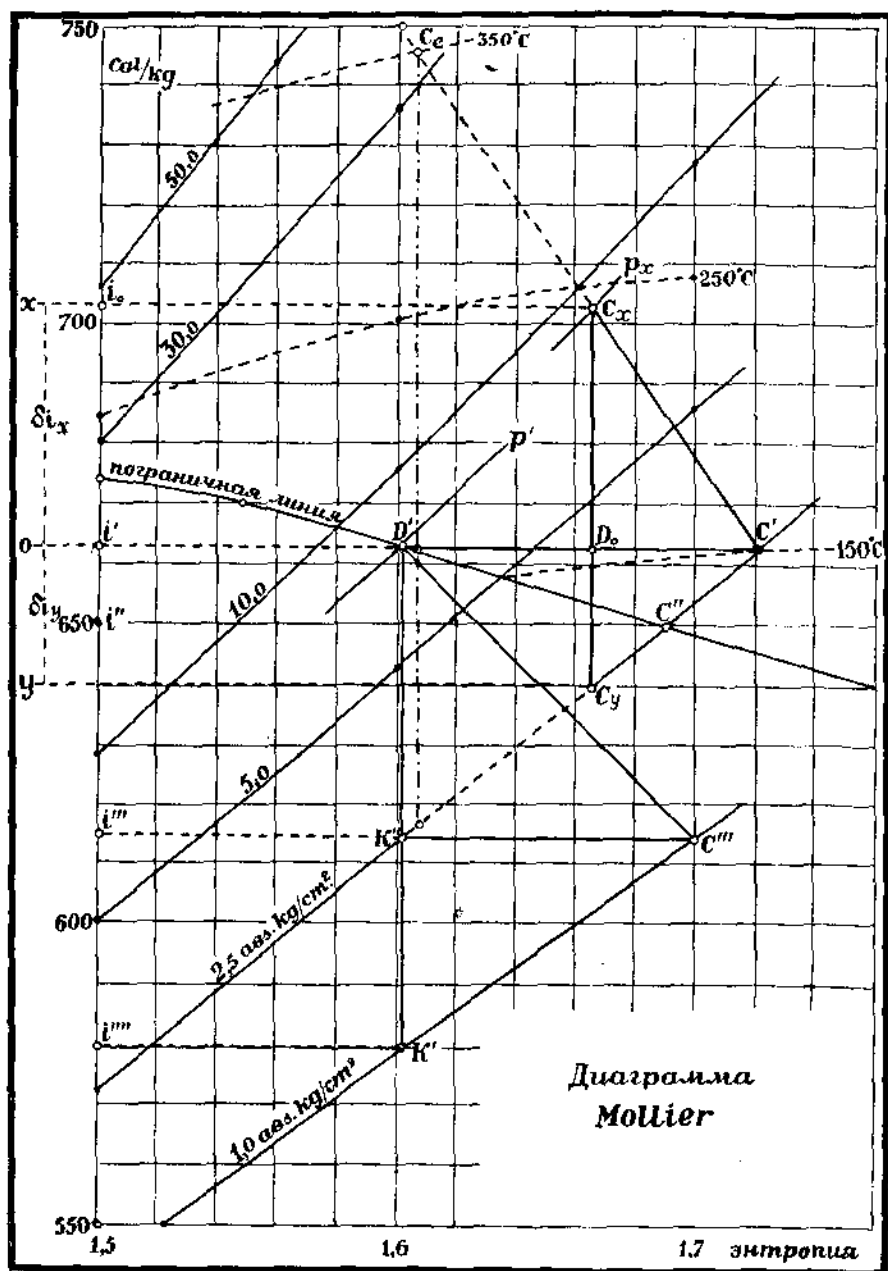
При раздельном хозяйстве 1 *kg* пара состояния *C* доставлялся бы или из котельной низкого давления (опять-таки с небольшим запасом на падение давления в паропроводе), либо из котельной повышенного давления, но через редуктор давления, путем процесса мятя пара.

Такой процесс изображался бы прямой почти практически параллельной оси энтропий, т.е., наприм., линией *D'C*, при чем ясно, что давление пара *p'* определяется пересечением *D'C* с пограничной кривой, и он будет сухой насыщенный; в процессе мятя, т.е. при $i' = const.$, он будет перегреваться, понижая давление, но не производя никакой работы.

При таком раздельном хозяйстве силовая энергия получалась бы от какого-либо, предположим, парового двигателя, который получал бы пар из той же котельной при состоянии его в точке *D'* и расширяясь адиабатически (если машина работает без потерь) по прямой *D'K'* до давления в конденсаторе (на чертеже не показанном), если она снабжена последним, или до давления в 1 *kg/cm² abs.*, если она работает на „выхлоп“.

Предположим для простоты последний случай; тогда конечная точка адиабатического расширения будет как раз *K'*; но так как машина несовершенна и внутренние потери ее на всевозможные мятя при переходе пара в органах машины обязательно существуют, то процесс будет состоять из некоторой адиабаты *D'K'* и некоторой прямой мятя *K''C''*, которой суммарно мы заменяем отдельные процессы мятя в различных органах машины.

¹ Вследствие уменьшения при клишировании масштаб диаграммы изменен на 156 *mm* = 200 *cal*.



Фиг. 1.

№№	Отрасль производства.	Ед. про- дукта.	Потребл. HP на ед. прод.	Потребление пара на ед. прод. kg.	Отношение kg произв. пара на HP kg.	Примечания.
1	Пивоварение	l	0,2 — 0,3	0,5 — 0,9	3 — 6 — 9	Группы II, где за счет производительного тепла почти нельзя иметь отбро- сов механ. энергии.
2	Бумажное	kg	0,4 — 0,6	2,5 — 3,0	4 — 6 — 7	
3	Каргоф.-крахмальное	*	0,1 — 0,15	1,0 — 2,0	7 — 11 — 20	
4	Целлюлозное	*	0,4 — 0,5	5,5 — 6,5	13 — 16	
5	Ткачное	*	0,5 — 1,0	8,0 — 12,0	8 — 16 — 24	
6	Кожевенное	*	1,0 — 1,3	16,0 — 24,0	12 — 18 — 24	
7	Шелковос	*	6 — 8	110 — 150	14 — 20 — 25	
8	Дрожжевое	*	0,6 — 1,0	16 — 22	15 — 25 — 40	
9	Сахарное (свекл.)	*	0,15 — 0,25	5 — 6	16 — 30 — 40	
10	Прачечные (мех.)	*	0,3 — 0,4	9 — 11	22 — 30 — 37	
11	Клеяваренное	*	0,7 — 0,9	25 — 35	28 — 40 — 50	
12	Каргоф.-папочное	*	0,05 — 0,07	2,2 — 2,8	30 — 45 — 56	
13	Красильное	*	0,05 — 0,01	3 — 5	30 — 65 — 100	
14	Спиртовые заводы	l	0,1 — 0,20	6 — 15	30 — 70 — 150	
15	Мыловаренное	kg	0,1 — 0,2	6 — 18	30 — 80 — 180	
16	Бани и купальни	пара.	0,3 — 0,5	40 — 70	80 — 100 — 230	

Значения отрезка $K''C''$ конечно различны для разных машин, и этим до известной степени определяется ее совершенство, характеризуясь отношением: $\frac{\text{полезной адиабаты}}{\text{к полной адиабате}} = \frac{D'K''}{D'K'} = \eta_{td}$, называемым термодинамическим коэфф. машины. Весь процесс работы пара (1 kg) может быть заменен линией $D'C''$, которая является гипотенузой 2-х катетов: адиабаты $D'K''$ и прямой мятя $K''C''$.

Но так как именно полезная адиабата определяет нам количество силовой энергии, полученное при работе 1 kg пара, то ясно, что величина последней будет равна: $\frac{i' - i'''}{860} = m' kWh$ на 1 kg пара, или: $\frac{i' - i'''}{860} \times \eta_{td} = m' kWh$ на 1 kg пара, если ввести теоретическое конечное тепловое содержание пара i''' , при полном адиабатическом расширении без потерь, и последние учесть коэффициентом η_{td} .

Если на 1 kg продукта в процессе его обработки требуется $\mu_0 kWh$, то число затраченных kg пара на их производство будет равно: $\frac{\mu_0 \cdot i'}{m' \cdot \eta_i} = q_p \text{ kg}$, где η_i — индик. к. п. д. машины \times к. п. д. всяких передач.

Ясно, что полный расход в случае раздельного хозяйства будет равен $(q_p + q_0) \text{ kg}$, а расход топлива: $\frac{(q_p + q_0) \cdot i'}{\eta_k \times K_0} = A_p$, где η_k — к. п. д. котельной, K_0 — теплотворная способность угля, а $i' \dots$ — начальное теплосодержание пара в точке D' .

При комбинированном энергетическом хозяйстве было бы возможным 1 kg пара, требуемый для производства и определяемый точкой C' , получить иным путем, заставив его проделать требуемую механическую работу, при этом термодинамический к. п. д. η'_{td} , вообще говоря, будет несколько другой, чем η_{td} в первом случае. Составим выражение:

$$\frac{\mu_0}{q_0} = \frac{\delta i_x}{860},$$

где δi_x есть искомое действительное адиабатическое теплопадение, которое было бы необходимо иметь в 1 kg пара, чтобы получить требуемое количество kWh на 1 kg пара в производстве.

Отсюда:

$$\delta i_x = 860 \cdot \frac{\mu_0}{q_0} = 860 \cdot \frac{\mu_0}{j_0} \lambda_0.$$

Но

$$\delta i_x = \eta'_{td} \cdot \delta i_t,$$

где δi_t — искомое теоретическое адиабатическое теплопадение при расширении пара от искомого его состояния до состоя-

ния, определяемого точкой C , и которое найдется, если известны η'_{td} и δi_x ; δi_x есть число калорий в верх от прямой CD' , а следовательно, $\delta i_y = \delta i_x \cdot \left(\frac{1}{\eta'_{td}} - 1 \right)$ есть число калорий в низ от прямой CD' , т. к. $\eta'_{td} = \frac{\delta i_x}{\delta i_x + \delta i_y}$.

Проведя оба известные нам отрезки δi_x и δi_y на диаграмме, что сделано влево от оси ординат, где $Ox = \delta i_x$ и $Oy = \delta i_y$, получим в C_y пересечение прямой $\overline{yC_y}$ с линией давления p_0 заданного условиями производства.¹

Восстанавливая \perp из C_y до пересечения его с прямой $\overline{xC_x}$, найдем искомую точку C_x , которой определяется требуемое начальное состояние пара, чтобы 1 kg его, произведя необходимую для производства уд. силовую энергию, был годен для дальнейшего процесса, уже только „теплого“, также в необходимом ее количестве.

Действительно $\eta'_{td} = \frac{\overline{C_x D_0}}{\overline{C_y C_x}}$, по заданию и построению: $\delta i_x = \overline{C_x D_0}$ и, следовательно, $\left(\frac{\overline{C_x D_0}}{860} \right)$ есть число kWh , полученных от 1 kg пара, и $q_0 \cdot \frac{\overline{C_x D_0}}{860}$ есть число kWh , полученных от q_0 kg пара; но так как $\overline{C_x D_0} = \delta i_x = 860 \cdot \frac{\mu_0}{q_0}$, то, заменяя, имеем тождество $q_0 \cdot \frac{860 \cdot \mu_0}{860 \cdot q_0} = \mu_0 kWh$, а это и требовалось доказать. Следовательно, весь пар, необходимый для производства силовой энергии $\mu_0 kWh$ на 1 kg продукта, произведет эту последнюю в случае, если начальное его состояние определится в точке C_x , если паровой двигатель будет иметь термодинам. к. п. д. η'_{td} , и почти без потерь отдает свою оставшуюся неиспользованной для получения мех. работы теплоту i' , при требуемом состоянии его, определяемом точкой C на „тепловое“ требование процесса в количестве q_0 kg на 1 kg продукта.

Пример. Коэффициент энергетической пропорциональности при $\mu_0 = 0,233 kWh$ и $q_0 = 5 kg$ на 1 kg продукта

$$\omega = \frac{q_0}{\mu_0} = 21,4 \left(\frac{kg \text{ пара}}{kWh} \right),$$

или:

$$\frac{1}{\omega} = \frac{\mu_0}{q_0} = 0,0465.$$

¹ На фиг. 1 это давление равно 2,5 атм. абс.

Если $C' \dots$ дает $5 \frac{kg}{cm^2} abs.$ и $150^\circ C^\circ$ при $i' = 663 cal. = \lambda_0$, а $\lambda_0 = 663 - 100^\circ = 563 cal.$ и $\eta'_{td} = 0,63$,¹ тогда

$$\delta i_x = \frac{860 \cdot \mu_0}{Q_0} = 860 \cdot 0,0465 = 40 cal.$$

и

$$\delta i_y = \left(\frac{1}{0,63} - 1 \right) \cdot \delta i_x = 0,6 \cdot 40 = 24 cal. \text{ (на 1 kg пара).}$$

Следовательно, C_y даст при $5 \frac{kg}{cm^2} abs.$ теплосодержание $639 cal.$, а C_x даст при $9,5 \frac{kg}{cm^2} abs.$ теплосодержание $703 cal.$ и при перегреве до $243^\circ C.$

Полный расход тепла на 1 kg продукта определится из выражения

$$i_0 \cdot q_0 = j_0 + \frac{\delta i_x \cdot \mu_0}{\eta'_i},$$

где η'_i — полный механ. к. п. д. двигателя \times к. п. д. передач.

Ясно также, что $\left(\frac{\delta i_x \cdot \mu_0}{\eta'_i} \right)$ значительно меньше $\frac{i' \cdot \mu_0}{m' \cdot \eta'_i}$; так, для данного примера:

$$a) \frac{\delta i_x \cdot \mu_0}{\eta'_i} = \frac{40 \cdot 0,233}{0,5} = 20 cal., \text{ и } б) \frac{\mu_0 \cdot i'}{m' \cdot \eta'_i} = \frac{0,233 \cdot 663}{\left(\frac{663 - 615}{860} \right) \cdot 0,5} = 5520 cal.,$$

е. полный расход тепла на ед. продукта:

$$\lambda_0 \cdot q_0 + \frac{\delta i_x \cdot \mu_0}{\eta'_i} = \begin{cases} a) 563 \cdot 5 + 20 = 2835 cal. \\ a \text{ для } б) 563 \cdot 5 + 5520 = 8335 cal. \end{cases} \left. \begin{array}{l} \text{на 1 kg} \\ \text{продукта.} \end{array} \right\}$$

Конечно, ради простоты и контраста мы привели пример, где для случая (б) раздельного хозяйства применена машина без конденсации.

Расход этой машины на 1 kWh равен $\frac{5520}{0,233} = 23700 cal.$ или $\frac{23700}{663} = 35,8 kg$ пара без учета механических потерь, а для работы с конденсацией этот расход мог бы быть понижен втрое и вчетверо; тем не менее в случае (а) соединенного хозяйства мы имеем практически бесплатное по расходу топлива получение энергии, если не считать 20 cal., затраченных на получение $0,233 kWh \times 860 cal.$ теоретических.

На этом примере ясно видна роль коэффициента энергетической пропорциональности рассматриваемого производства; несо-

¹ Принимается, как вероятное.

мненно, что с уменьшением значения q_0 и повышением μ_0 , т.-е. уменьшением КЭП условия соединения таким простым способом, как установкой машины, работающей с чистым противодавлением, ухудшаются. Чтобы найти полное согласование и в этих случаях расхода тепла и силовой энергии, предположим, что противодавление остается тем же, так же как и требуемая температура, т.-е. точка C^1 попрежнему характеризует условия состояния пара для производственного процесса.

При современном состоянии техники давления пара порядка 35—40 *atm. abs.*, с перегревом 350—375° С, следует уже принимать как нормально высокие. Если при заданном значении $\omega = \frac{q_0}{\mu_0}$ искомая точка попадает в область 35—40 *atm.* при указанных перегревах, то следует считать, что мы имеем почти предельный случай применения турбины или машины с противодавлением, если не считаться пока еще с возможностью идти до 100 $\frac{kg}{cm^2}$ и выше, и до 400° С перегрева; по эксплуатации таких установок нет еще основательных данных, служащих базой для установок в русских производственных условиях.

Основываясь в настоящий момент на этих допустимых пределах, и чтобы найти при этом предельную величину коэффициента энергетической пропорциональности, продолжим прямую C^1C_x , построенную при $\eta'_{td} = 0,63$,¹ каковой коэффициент также является примерно средним практическим,² до пересечения с линией давлений около 35 $\frac{kg}{cm^2}$ *abs.* в точке C_e при температуре около 350° С.

Другими словами, учитывая потери давления и температуры в паропроводах, котельная должна давать пар около 40 $\frac{kg}{cm^2}$ *abs.*, и около 375° С, и при этих условиях 1 *kg* пара даст силовую энергию от значительно расширенного теплопадения:

$$(\text{lim.}) \delta i_x = 751 - 663 = 88 \text{ cal.},$$

или кругло предельное количество эл. энергии, $(\text{lim.}) \left(\frac{\mu_0}{q_0} \right) = \frac{88}{860} = 0,1 \text{ kWh}$ на 1 *kg* пара, а это в свою очередь определяет пре-

¹ Erste Brünner Fabrik дает для своих турбогенераторов с противодавлением значения $\eta'_{td} = 0,78$, без учета холостого хода. Все-таки эта цифра является пока исключительной и нормально η'_{td} лежит в пределах: 0,75—0,65.

² Для турбин небольшой мощности.

дельный коэффициент энергетической пропорциональности для производства и для противодавлений порядка $2,5 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ abs., в:

$$\omega_{\text{ит}} \cong 10.$$

Ориентировочная таблица дает, что отношение $\left(\frac{q_0}{\mu_0}\right)$, близкое к 10, имеет место для производств:

- | | | |
|---------------------------------------|---|---|
| 1) картофельно-крахмальные, | } | близкие к значению $\frac{q_0}{\mu_0} \cong 10$. |
| 2) целлюлозные, | | |
| 3) ткацкие. | | |
| 4) кожевенные, | | |
| 5) дрожжевые, | } | близкие к значению $\frac{q_0}{\mu_0} > 10$. |
| 6) шелковые, | | |
| 7) свекло-сахарные, | | |
| 8) прачечные, | | |
| 9) клееваренные и костеобжигательные, | | |
| 10) винокуренные, | | |
| 11) красильные, | | |
| 12) ситценабивные, | | |
| 13) спиртовые, | | |
| 14) мыловаренные, | | |
| 15) бани и ванные заведения, | | |
| 16) центральные отопления. | | |

Остаются только несколько типичных производств, где энергетический коэффициент < 10 , именно: 1) пивоваренное (весьма близкое к предельному), 2) бумажное, для которых следует искать другого разрешения вопроса, несколько более сложного, если не считаться с возможностью дальнейшего повышения начального давления и перегрева, 3) машиностроение и 4) полиграфическое производство.

Остальные производства относятся уже к группам, где $\left(\frac{q_0}{\mu_0}\right)$ почти нуль, если не считать расхода на отопление, и в этих случаях группировка их должна следовать другому способу комбинирования энергетического хозяйства, т.е. использованию теплоты отходящих газов (цементные заводы и вообще керамическая

промышленность), или использованию отбросов производства (доменные заводы).

Приведенный выше, несколько видоизмененный, способ определения начального состояния пара в установках, где величина энергетического коэффициента это позволяет, приведен в статье инж. Vente, ¹ откуда мы кроме того используем некоторые данные по величине и характеру изменения (фиг. 2):

во-1-х: коэффициента полезного действия турбогенераторов, при разных $\cos\varphi$ и мощностью от 200 до 4000 *kVa*, при $n=3000$ оборот. (мин. и $\frac{1}{4}$ нагрузки);

во-2-х: термодинамического к. п. д. турбин с противодавлением от 200 до 4000 *kVa*, измеренных на соединительной муфте агрегата, при разных температурах перегрева пара при $n=3000$ оборот. (мин. и при разных температурах), и

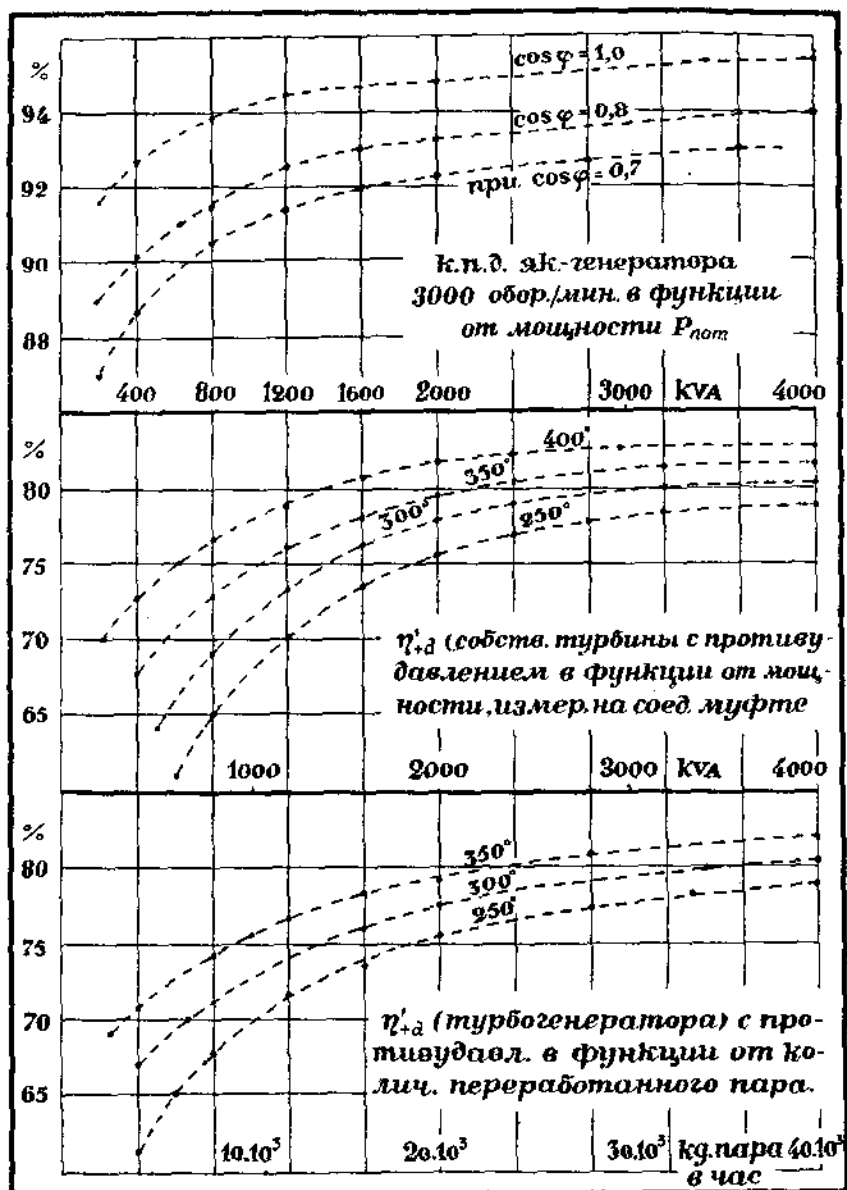
во-3-х: изменение полного терм. к. п. д. турбогенератора с противодавлением в зависимости от количества пара в *kg brutto*, при $n=3000$ об. и разных температурах перегрева пара; эти кривые являются вспомогательными для уточнения расчетов, пока приближенных и дающих только масштабные величины.

Из кривых термодинам. к. п. д. турбогенераторов с противодавлением мы видим, что величина его колеблется в довольно широких пределах и следовательно после предварительного определения требуемого состояния пара необходимо сделать соответствующую поправку на мощность и на температуру перегретого пара.

Необходимо указать кроме того, что к. п. д. при изменении паровой нагрузки приведены здесь для соплового (парциального) регулирования; при дроссельном регулировании эти коэффициенты будут быстро уменьшаться с уменьшением нагрузки.

В первой части нашей статьи была поставлена общая задача выяснить, во-1-х, категории производств, где мы имеем практическую возможность рационализировать энергетическое хозяйство так, чтобы за счет производственного расхода тепла получить необходимое количество производственной силовой (электрической) энергии, и, во-2-х, — найти основания для простого расчета основных элементов подобной установки, пользуясь достижениями в области повышенных давлений пара и его перегрева.

¹ Siemens-Zeitschrift. 1924, октябрь, № 10.



Фиг. 2.

Для основательного, хотя, конечно, все же предварительного, расчета баланса тепла подобных установок, необходимо составление „тепловой“ характеристики турбогенератора, т. е. зависимости расхода калорий при разных нагрузках его от $\frac{1}{4}$ до холостого хода,

что не всегда ясно представляется проектирующим, в особенности для турбин с дроссельным регулированием. Кроме того весьма важно свободно разбираться в калорийной ценности пара, расходуемого турбогенератором, и отработанного пара, утилизируемого в производственных тепловых процессах.

Пусть $\delta i_x + \delta i_v = \delta i_t$ при $1/4$ нагрузки турбогенератора, при расходе им пара в количестве $G_{1/4}$ kg в час; теплота пара i в точке C_x , или t на фиг. 3 будет равна i_n cal., а конечная в точке p'_k (фиг. 3) — i_k cal.

Если мощность турбогенератора на электрических борнах генератора будет равна W_{eff} kW, а внутренняя (индикаторная) мощность, развиваемая турбиной на ободе рабочих колес при холостом ходе — W_{xx} kW, то имеем право написать:

- 1) Для расхода пара в kg/h при полной нагрузке:

$$\frac{860}{\delta i \eta_{td}} \cdot (W_{eff} + W_{xx}) = G_{1/4}$$

- 2) Для расхода пара в kg/h при холостом ходе: $\frac{860}{\delta i \eta_{td}} \cdot W_{xx} = G_0$,

где η_{td} принято const., а $\delta i = \overline{t' p_k}$ и $\delta i_0 = \overline{F p''_k}$; если путем оценки потерь $W_{xx} = 0,08 \cdot W_{eff}$ ¹ и затем по эмпирической формуле:

$$G_0 = \left\{ \frac{3}{\sqrt{P_{ном}}} + 0,25 \right\} \cdot G_{1/4} \text{ kg/h}$$

при дроссельном² регулировании определить G_0 , то можно найти необходимое теплопадение для холостого хода δi_0 из выражения:

$$3) \delta i_0 = \delta i \cdot \frac{W_{xx}}{W_{eff} + W_{xx}} \cdot \frac{G_{1/4}}{G_0}$$

где все величины заданы.

¹ Оценка индик. мощн. холостого хода турбогенератора (трехфазного тока) должна быть произведена по примерным нормам эл.-мех. заводов; инж. Р. А. Лютер дает следующие потери при мощностях от 500 до 1500 kW в среднем.

- 1) Потери на механ. трения в подшипниках генератора . . . от 1 до $1\frac{1}{2}\%$
- 2) " " вентиляцию генератора ок. 2 — $2\frac{1}{2}\%$
- 3) " " " " " при хол. работе 2 — $2\frac{1}{2}\%$
- 4) " " возбуждение, включая потери в реостате . . . 1 — $1\frac{1}{2}\%$

Прибавляя на турбину:

- 1) Потери на мех. трения в подшипн. турбин от 1 — 2%
- 2) Вентиляционные потери 1 — 2%

Всего от 8 до 12%

при холостом ходе. Потери на эффект Джоуля при $1/4$ нагрузке и $\cos \varphi = 1$ можно считать от 2 до 3% добавочно.

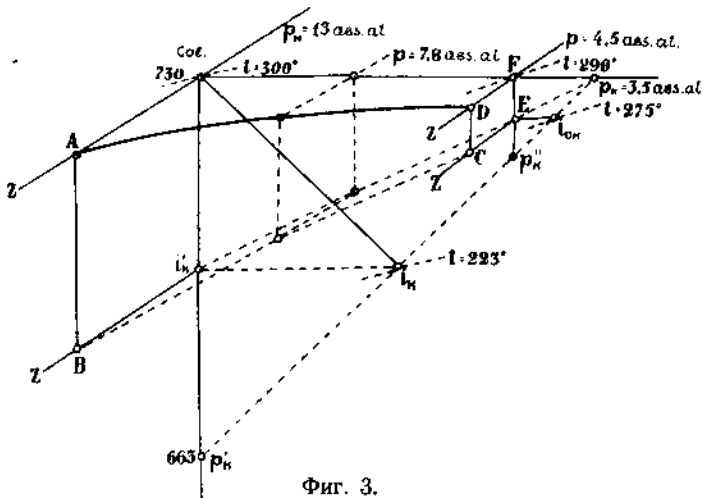
² При сопловом регулировании можно принимать расход холостого хода

$$G_0 = \frac{3}{\sqrt{P_{ном}}} \cdot G_{1/4}, \text{ где } P_{ном} - \text{нормальная мощность турбогенератора.}$$

4) Но:

$$\frac{860}{\delta i \cdot \eta_{fd}} \cdot (W_{eff} + W_{xx}) = \left[G_{4/4} \cdot i_n + G_{4/4} \cdot i_k - G_{4/4} \cdot i_k \right] \cdot \frac{1}{i_n} = \\ = G_{4/4} \cdot \frac{\delta i \cdot \eta_{fd}}{i_n} + G_{4/4} \cdot \frac{i_k}{i_n}$$

$$\frac{860}{\delta i_0 \cdot \eta_{fd}} \cdot W_{xx} = G_0 \cdot \frac{\delta i_0 \cdot \eta_{fd}}{i_n} + G_0 \cdot \frac{i_{ok}}{i_n};$$



Фиг. 3.

след., отбрасывая члены с коэфф-ми $\left(\frac{i_k}{i_n}\right)$ и $\left(\frac{i_{ok}}{i_n}\right)$, как выражающие теплоту, во всяком случае утилизируемые в производстве, можем построить тепловую характеристику x_u по двум точкам (Фиг. 4):

1) При полной нагрузке расход пара netto = $G_{4/4} \cdot \frac{\delta i \cdot \eta_{fd}}{i_n}$

2) При холостом ходе " " " = $G_0 \cdot \frac{\delta i_0 \cdot \eta_{fd}}{i_n}$, где

все величины известны.

Для тепловой характеристики производственного пара строим прямую¹ TR также по двум точкам:

1) При полной нагрузке: $G_{4/4} \cdot \frac{i_k}{i_n}$ кг/ч.

2) При холостом ходе: $G_0 \cdot \frac{i_{ok}}{i_n}$.

Пример: Турбогенератор с дроссельным регулированием $W_{eff} = 900$ kW должен работать на противодавление $p_k = 3,5 \frac{kg}{cm^2}$;

¹ Практически.

теплота пара $i_n = 730 \text{ cal.}$, при $t = 300^\circ\text{C}$. Тогда $G_0 = 0,35 \cdot G_{1/4}$, т. к. $\frac{3}{\sqrt{900}} + 0,25 = 0,35$.

Если $\eta_{td} = 0,50$ и по оценке

$$W_{xx} = 0,08 \cdot (W_{eff} + W_{xx})$$

(эл. и мех. потери считаем с приближением почти одинаковыми при $1/4$ и хол. ходе), то имеем по диаграмме (фиг. 3):

$$\delta i_t = 67 \text{ cal.}, \text{ след. } \delta i_t \cdot \eta_{td} = 32 \text{ cal.}$$

с округл., с учетом охлаждения:

$$\delta i_0 = 67 \cdot \frac{0,08}{0,35} = 15,4 \text{ cal.},$$

следовательно:

$$\delta i_0 \cdot \eta_{td} = 7,7 \text{ cal.};$$

считаем на 5% меньше, учитывая охлаждение, т.-е. 7,3 cal.

$$G_{1/4} = \frac{860}{32} \cdot (900 + 72) = 26\,000 \text{ kg/h с округл.}$$

$$G_{1/4} \cdot \frac{\delta i_0 \cdot \eta_{td}}{i_n} = \frac{26\,000 \cdot 32}{730} = 1176 \text{ kg/h с округл.}$$

(расход netto на электр. энергию).

$$G_0 = 0,35 \cdot 26\,000 = 9100 \text{ kg/h с окр. для расхода brutto, и}$$

$$G_0 \cdot \frac{\delta i_0 \cdot \eta_{td}}{i_n} = \frac{9100 \cdot 7,3}{730} = 91 \text{ kg/h с окр. для расхода netto}$$

на инд. мощность холостого хода с возбуждением. Затем:

$$G_{1/4} \cdot \frac{i_k}{i_n} = 26\,000 \cdot \frac{697}{730} = 24\,825 \text{ kg/h}$$

есть расход „netto“ на производственное тепло. И, наконец:

$$G_0 \cdot \frac{i_{0k}}{i_n} = 9100 \cdot \frac{722,7}{730} = 9000 \text{ kg/h}$$

есть расход „netto“ на произв. тепло при холостом ходе:

$$W_{eff} = 900 \text{ kW. и } W_{xx} = 72 \text{ kW.}$$

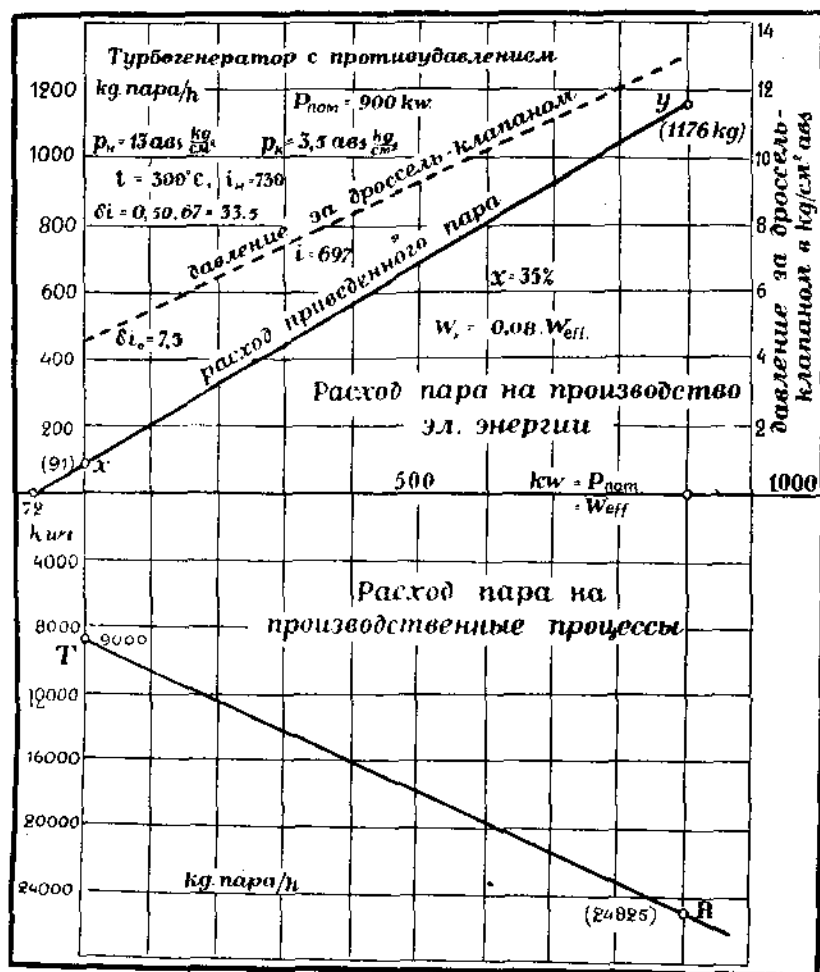
По фиг. 3 давление пара перед дроссель-клапаном

$$p_n = 13 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \text{ abs. (из диаграммы Mollier).}$$

Давление пара после дроссель-клапана при $1/4$ нагрузки будет также равно:

$$p_n = 13 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \text{ abs,}$$

если не учитывать запаса давления на небольшое мятие пара при $1/4$ нагр.



Фиг. 4.

Давление пара после дроссель-клапана

$$p = 4,5 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \text{ abs.},$$

при холостом ходе с возбуждением.

Для более ясного понимания механизма работы пара в турбине, проведем ось Z -ов перпендикулярно (фиг. 3) к плоскости диаграммы Mollier и отложим tA (в каком-либо масштабе) $= p_n = 13 \text{ ат}$. Затем строим FD (в том же масштабе) $= p = 4,5 \text{ ат}$., также одну или две точки промежуточных давлений, напр.,

$p = 7,8 \text{ atm.}$, и начертим кривую \widehat{AD} . Из точек кривой \widehat{AD} ; опустим проекцию на плоскость $\widehat{B'i_k'EC}$ и найдем проекцию \widehat{BC} кривой \widehat{AD} .

Ясно, что т. к. объем пара $Q \text{ m}^3/\text{h}$, при дроссельном регулировании остается постоянным, то вообще $G = Q : v$, где v — уд. объем пара давления „ p “ опред. температуры, и где $p \cdot v = R \cdot T$; T — *abs.* температура пара, близко постоянная для небольших изменений p и v , а R — газовая постоянная для перегретого пара. Тогда:

$$\frac{860}{\delta i \cdot \eta_{td}} \cdot (W_{eff} + W_{xx}) = \frac{Q}{v_n} = \frac{Q \cdot p_n}{R \cdot T},$$

т. е.

$$W_{eff} + W_{xx} = C \cdot \delta i \cdot p_n,$$

где $C = \frac{Q}{RT} \cdot \frac{\eta_{td}}{860}$ величины *const.*

Это верно для всякой нагрузки и для разных p и δi , вплоть до холостого хода, где

$$W_{xx} = C \cdot \delta i_0 \cdot p_d,$$

где p_d давление перед дроссель-клапаном, при холостом ходе.

Отсюда следует, что плоскости прямоугольников $\widehat{A'i_k'B}$, перемещаясь вправо, параллельно самим себе, до значения \widehat{DFEC} , будут изображать по величине индикат. мощности турбогенератора для соответствующих давлений p_d , p'_d , p''_d и т. д.

Но кроме того, и т. к.

$$\frac{860}{\delta i \cdot \eta_{td}} \cdot (W_{eff} + W_{xx}) = G_{v_1} = C \cdot p,$$

где C — также постоянная, то ординаты кривых \widehat{AD} (или \widehat{BC}) в соответствующих местах p будут изображать не только давления за дроссель-клапаном, но и расходы пара в kg/h brutto.

III.

После построения тепловых характеристик не трудно составить баланс тепла всей установки для полной нагрузки турбогенераторной установки, пользуясь общеизвестным методом составления подобных балансов.¹

¹ См. Проф. В. В. Дмитриев. Основы проектирования ЦЭС. Изд. 1925 г.

Тепловой баланс производственно-тепловой части
(рассчитан на 100%).

	Пост. потеря.	Перем. расх.	Всего.	Примечание.
I. а) Поступает к котлам топлива	15%	85%	100%	
б) отводится паром	—	—	72,5%	
II. а) поступает паром в паропровод низкого давления	7,5% ¹	65%	72,5%	1) от 10 до 15% потери на охлаждение длинных паропроводов низкого давления.
б) отводится паром к бойлерам	—	—	65,0%	
III. а) подводится паром к бойлерам	1,0% ²	64,0	65,0%	2) 1 ¹ / ₂ % на охлаждение бойлеров в подвалах зданий.
б) отводится к радиаторам	—	—	64,0%	3) потери в конденсац. водоотводе.
IV. а) подводится к радиаторам	3,2% ³	60,8%	64,0%	4) 100 cal. на i_k кал. или приблизительно.
б) отводится конденсатом ⁴ в котлы	—	60,8 =	$\left\{ \begin{array}{l} 14,3\% \\ 46,5\% \end{array} \right.$	$\frac{100}{700} \cdot 100 = 14,3\%$
отводится полезно для целей отопления	—	—		

В виду того, что конденсат поступает вновь для питания котлов, потеря 14,3% не представляет в сущности потери в топливе и должна быть приложена к 100% топлива, т.-е. к. п. д. тепловой части установки будет равен:

$$\eta_{\text{эк.}} = \frac{46,5 + 14,3}{100} \times 100 = 60,8\%$$

Общий к. п. д. комбинированной установки по правилу смешения:

$$\eta_{\text{эк. (общ.)}} = 100 \times \frac{0,60,8 \times 21,13 + 0,62}{21,13 + 1,0} = 58,05\%$$

При всякой другой средней нагрузке турбогенераторной установки с противодавлением и при условии, что весь отработанный пар утилизируется в производстве, будем иметь „средний“ расход на kWh:

$$x_m = 338 \cdot \frac{1}{b_m} + 1062 \text{ cal.},$$

где b_m есть средн. коэф. загрузки турбоагрегата за определенный период (напр., сутки или год).

Из вышеуказанных расчетов видно, что при выборе соответствующих давлений и перегревов пара и для определенного коэф. энергетической пропорциональности возможны такие достижения в расходе cal/kWh требуемой силовой энергии, что борьба даже весьма мощных ЦЭС за гегемонию в деле электроснабжения значительной группы производственных предприятий почти невозможна.

ПРОБЛЕМА ТЕПЛОВОЗА.

Проф. Я. М. Гаккель и инж. Н. Т. Матвеев.

Известно, что экономический коэффициент полезного действия паровоза времен Стефенсона едва достигал 4%, т.е. только 4% энергии сжигаемого в паровозе топлива превращались в полезную работу, а 96% пропадали бесплодно. С тех пор прошло сто лет, и в усовершенствованных современных паровозах - компаунд, работающих перегретым паром, имеющих подогрев питательной воды, коэффициент полезного действия достигает максимум 9%. В современных же крупных стационарных силовых паро-турбинных установках получается коэффициент полезного действия до 24—27% и до 32% в установках с двигателями внутреннего сгорания. На столь крупную разницу в степени использования энергии топлива нельзя не обращать внимания в виду той огромной роли, которую играет паровоз в силовом хозяйстве страны.

Статистика указывает, что, например, у нас в 1913 г. суммарная мощность всех стационарных промышленных тепловых двигателей составляла около 3,25 миллионов *HP*; суммарная мощность двигателей коммерческого флота, речного и морского — около 1,25 миллионов *HP*, а суммарная мощность всех паровозов достигала 9,5 миллионов *HP*, т.е. почти в два раза превышала мощность всех стационарных (промышленных) и судовых тепловых двигателей.

Далее, статистика дает следующие цифры расхода топлива в том же году:

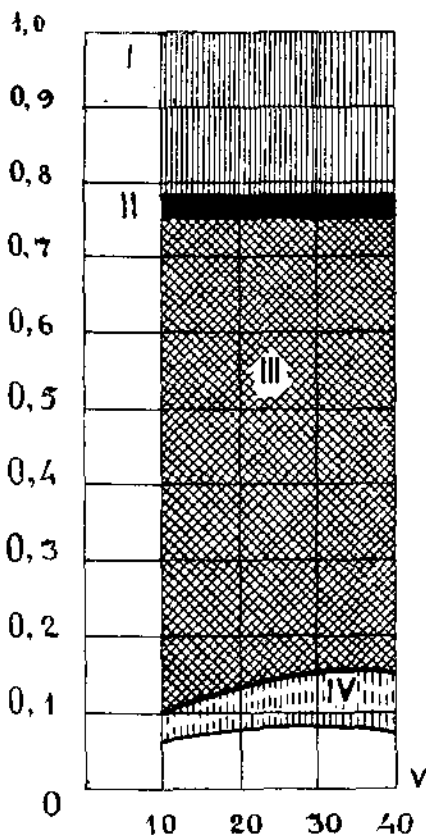
Суммарный расход каменного угля в стране	2701.10 ⁶ пуд.,
в том числе на паровозы	501.10 ⁶ „ „
т.е. 18,6%.	
Суммарная добыча нефтяного топлива в стране	559.10 ⁶ „ „
расход нефтяного топлива на паровозы	94.10 ⁶ „ „
т.е. 16,8%.	

Отсюда понятно огромное значение паровозов как потребителей топлива, и столь же понятно стремление построить такой локомотив, который не выпускал бы буквально на ветер свыше 90% энергии сжигаемого им топлива, а утилизировал ее более экономно. Что же может быть сделано в этом направлении при современном состоянии техники?

Обратимся к тепловому балансу современного паровоза.

На фиг. 1 изображен такой баланс для паровоза серии ЭГ при обычной в условиях товарной службы форсировке котла $Z=25$, т.е. при сжигании в 1 час 25 kg пара с 1 квадратного метра поверхности нагрева котла. Паровозы ЭГ были изготовлены по русскому заказу в Германии в 1923 г., работают перегретым паром и по справедливости относятся к числу лучших русских товарных паровозов. Таким образом у нас имеются все основания строить свои рассуждения о современных паровозах, исходя из теплового баланса паровоза ЭГ.¹

На чертеже по оси абсцисс отложены скорости паровоза в километрах в час, а по оси ординат доли энергии топлива. Незаштрихованной оставлена часть графика, отвечающая той доле энергии топлива, которая превращается в работу на ободах колес паровоза; различными штриховками показаны различные потери, а именно: I — потери в котле, II — потери на воздушный тормаз, III — потери в идеальной паровой машине, IV — дополнительные потери в реальной машине, работающей при той же степени расширения, из которых самая крупная — на охлаждение пара внутри цилиндров под действием стенок.



Фиг. 1.

¹ См., напр., проф. Ю. В. Ломоносов, Тепловоз Ю₀001 и его испытание в Германии. Берлин, 1925 г.

Ясно, что для увеличения коэффициента полезного действия паровоза надо уменьшить эти потери. Потери II и IV относительно не велики и вряд ли могут быть значительно уменьшены, так как, повидимому, в этой области использованы уже все возможности.

Потери I (в котле) велики, но коэффициент полезного действия современного паровозного котла достигает 65 — 75%, и при необходимости втиснуть его в узкие рамки железнодорожного габарита и поставить на колеса для машины в 1200 — 2000 HP (мощность современных паровозов) вряд ли удастся внести в конструкцию этого котла такие изменения, которые могли бы скольконибудь значительно повысить его коэффициент полезного действия. Остаются потери III — в идеальной машине, которые могут быть уменьшены: 1) путем значительного повышения давления пара, 2) путем применения холодильников, 3) путем замены поршневой машины паровой турбиной. Попытки в перечисленных направлениях делаются такими крупными фирмами, как Крупп¹ в Германии и Юнгстрем в Швеции. Но построенные ими первые локомотивы еще не вышли из стадии опытов, и потому еще нет данных практики о их преимуществах и недостатках.

Однако, можно утверждать и сейчас, что даже при наиболее благоприятных условиях получить от таких локомотивов термический коэффициент полезного действия выше 15% невозможно по самой сути термодинамических процессов, совершающихся в паровой машине или турбине, в которых подавляющее количество энергии топлива уходит из машины вместе с отработанным паром.

Замена паровоза электрической тягой, обладающей, кроме того, целым рядом других преимуществ, возможна только при наличии в данном районе дешевой энергии: в виде воды, торфа или бурого угля, не выдерживающих перевозки. Экономические подсчеты показывают, что электрическая тяга окупается только при относительно густом движении. Поэтому говорить об электрификации железных дорог, как об универсальном средстве, позволяющем отказаться от неэкономичных паровозов, пока не приходится.

Остается указать еще на последний путь, являющийся основной темой данной статьи, именно, на замену паровоза локомотивом с двигателем внутреннего сгорания, который в нормальных ста-

¹ См. *Kruppsche Monatshefte*. 1923, 1, S. 1.

ционных эксплуатационных условиях дает термический коэффициент полезного действия от 28 до 32%, а в некоторых новейших установках с утилизацией тепла выхлопа даже до 38—40%.

В этом направлении работала последние 20 лет и продолжает работать в настоящее время техническая мысль и у нас, и в Западной Европе, и за океаном.

Первым локомотивом с двигателем внутреннего сгорания, или, по установившейся у нас терминологии, тепловозом, предназначенным для работы на рельсовых путях, обычно называют локомотив с двигателем автомобильного типа и зубчатой передачей между двигателем и колесами, построенный заводом Даймлера в Штуттгарте в 1891 г.¹ Мощность этого первого тепловоза равнялась всего 4 НР. Первый мощный поездной тепловоз — пассажирская машина типа 2-2-2 с двухтактным дизелем двойного действия, от коленчатого вала которого движение передавалось колесами помощью спарников, был заказан заводам Борзиг и Бр. Зульцер управлением Прусских железных дорог в 1906 г. Машина эта строилась свыше 6 лет, и, когда она была закончена, пробные поездки показали полную ее непригодность к железнодорожной службе. В 1913 г. после аварии (лопнул цилиндр у двигателя) машина была сдана в лом, и сооружение мощных поездных тепловозов возобновилось лишь по заказам нашего правительства — в 1922 г., постройкой в Ленинграде тепловоза Г21 системы проф. Я. М. Гаккель и, в 1923 г., в Германии — Ю2 001 под руководством проф. Ю. В. Ломоносова. Оба эти тепловоза были закончены в 1924 г., вступили на рельсовую сеть СССР — первый — 6 ноября 1924 г., а второй — 18 января 1925 г., и в настоящее время, после целого ряда пробных поездок и испытаний, находятся в опытной эксплуатации на первом тепловозном участке Московско-Курской ж. д., где они водят товарные поезда между Москвой и Курском. Следовательно, понадобилось почти 20 лет, чтобы проделать путь от 1-го германского тепловоза, возвращавшегося с помощью паровоза почти из каждой пробной поездки вследствие поломок, до современных русских тепловозов, уже совершавших с товарными поездами весом в 1000 т и более пробеги в тысячи километров без аварий.

Главной причиной задержки создания практически пригодного для железнодорожной службы тепловоза было отсутствие доста-

¹ См. Романов — Паровозы. 1900, стр. 383.



точно легкого, компактного и прочного двигателя внутреннего сгорания большой мощности. В настоящее время эти трудности в большей их части остались уже позади. За время войны, главным образом под влиянием развития техники подводных лодок, заводы выработали тип относительно быстроходного дизеля, мощностью до 1000 и даже 1300 *HP* при 400—450 об/мин. и весом от 30 до 23 *kg* на действительную лошадиную силу *HP*.

Введением электрической передачи между этими двигателями и ведущими осями локомотива разрешен вопрос о придании тепловозу такой тяговой характеристики, которая позволила бы ему успешно конкурировать с локомотивами других типов. Таким образом проблему создания мощного локомотива с двигателем внутреннего сгорания можно считать в основных чертах разрешенной.

В первых по времени проектах тепловозов обычно применялась неизменная кинематическая связь между валом двигателя и ведущими осями тепловоза. Именно такая связь была выполнена в первом мощном тепловозе, построенном заводом Бр. Зульцер, о котором мы говорили выше; такая же связь была намечена и в описанном проф. В. И. Гриневецким проекте тепловоза типа 3-3-3 с двутактными дизелями, расположенными подобно паровозной машине.¹

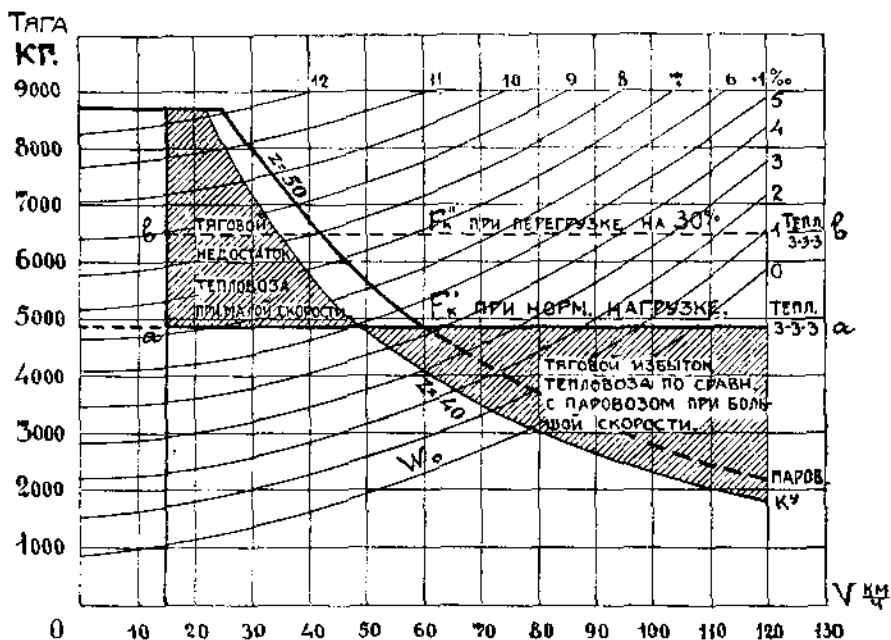
Весьма интересно сопоставить тяговые свойства этого тепловоза с неизменной кинематической связью между валом двигателя и ведущими осями с тяговыми свойствами паровоза типа *Ky*.

Тяговые свойства всякого локомотива определяются его тяговой характеристикой, т.е. зависимостью между развиваемой локомотивом касательной силой тяги (иначе — силой тяги на ободу колес) и его скоростью. На фиг. 2 приведены для сравнения тяговые характеристики паровоза *Ky* при различных форсировках котла и упомянутого выше тепловоза 3-3-3. Изображенные на чертеже две характеристики этого тепловоза отвечают — одна (аа) нормальной подаче топлива в цилиндры двигателя, т.е. нормальной его нагрузке (среднее индикаторное давление p_i равно $6,5 \text{ kg/cm}^2$), другая (вв) — перегрузке двигателя на 30% (p_i равно $8,0 \text{ kg/cm}^2$). Расчетное задание для этих локомотивов — вести пассажирский поезд в 48 осей, весом 480 *t*, на подъем в 8 тысячных со скоростью 42 *km* в час. Кривые полного сопротивления

¹ См. Гриневецкий, В. И. — Проблема тепловоза и ее значение для России. Москва, 1924, стр. 39 — 41.

движению такого поезда на различных подъемах от 0 до 12 тысячных также нанесены на фиг. 2; вес локомотива принят равным 125 t, откуда общий вес поезда получается в 605 t.

Из рассмотрения фиг. 2 мы видим, что расчетное задание паровоза К_У выполняет при несколько повышенной против нормы форсировке котла $Z=50$, а тепловоз 3-3-3 — при перегрузке двигателя на 30%, оба развивают при этом тяговое усилие в 6440 kg.



Фиг. 2.

участок с переменным продольным профилем, с подъемами от 0 до 12 тысячных, и посмотрим, как будут вести себя на этом участке наши паровоз и тепловоз. Пусть во все время поездки по участку форсировка паровоза $Z=50$, и, следовательно, и его мощность остается постоянной. Из тяговой характеристики паровоза видно, что, как только паровоз с более легкого участка профиля вступает на более тяжелый, и его скорость, а значит, и число оборотов машины начинает понижаться, тотчас же автоматически начинает повышаться среднее индикаторное давление в его цилиндрах, каковому повышению мы можем помочь, открывая больше регуля-

тор и давая большую отсечку при том же расходе пара в час, т.-е. при той же мощности паровоза; вследствие повышения среднего индикаторного давления в цилиндрах развиваемое паровозом тяговое усилие также начинает возрастать и растет до тех пор, пока не установится равновесие между этим усилием и сопротивлением движению поезда. При понижении скорости — например, до 25 km/h , тяговое усилие паровоза К $\bar{У}$ возрастает до 8500 kg , т.-е. паровоз К $\bar{У}$ при такой скорости вполне способен вести расчетный состав на 12-ти тысячный подъем.

Не трудно показать, что и обратно, при переходе на более легкий участок скорость движения паровоза увеличится, а развиваемое им тяговое усилие будет падать. Так как сопротивление движению поезда с увеличением скорости возрастает, то равновесие и здесь немедленно наступает.

Если мы тому же паровозу дадим иной, отличающийся от расчетного состав, с иным сопротивлением движению, то и в этом случае паровоз приспособится к различным условиям профиля также легко и быстро, — конечно, при условии, чтобы для ведения этого состава не потребовалась сила тяги, выходящая за пределы, обусловленные типом данного паровоза.

Следовательно, паровоз при постоянной мощности в широких пределах приспособляется к условиям профиля, к весу поезда, и потому с точки зрения механики движения поезда — паровоз является вполне пригодным локомотивом. Еще в большей мере этим свойством обладают электровозы с серийными двигателями постоянного и переменного токов, являющиеся идеальными локомотивами.

Совершенно иная картина имеет место для взятого тепловоза с постоянной кинематической связью вала двигателя и ведущих осей.

В таком тепловозе тяговое усилие почти пропорционально количеству топлива, сжигаемого в цилиндрах двигателя за один оборот (или, что то же самое, среднему индикаторному давлению в его цилиндрах). Следовательно, при некоторой определенной подаче топлива, скажем, отвечающей перегрузке двигателя на 30%, это тяговое усилие остается, примерно, постоянным при всяком числе оборотов двигателя, т.-е. при всякой скорости тепловоза, а мощность, развиваемая тепловозом, изменяется при этом, примерно, прямо пропорционально его скорости. Здесь никакого повышения тягового усилия при уменьшении скорости, о котором

мы только что говорили в применении к паровозу, не получается, и если бы мы хотели помощью такого тепловоза, рассчитанного по заданиям для паровоза КУ, вести состав в 480 т на участке с 12-ти тысячными подъемами, что, как мы видели, при паровозе КУ вполне возможно, — мы это выполнить не смогли бы, так как даже при перегрузке двигателя на 30%, развиваемое тепловозом тяговое усилие едва достаточно для того, чтобы вести состав в 480 т на 9-ти тысячный подъем (см. фиг. 2).

С другой стороны, из той же фигуры видно, что тепловоз, сохраняющий постоянное тяговое усилие и при больших скоростях, чего мы в паровозе не имеем, может на легких участках профиля развить гораздо большие скорости, чем те, которые на тех же участках и с тем же составом могли бы быть получены помощью паровоза КУ. Однако, следует отметить, что эти большие скорости далеко не всегда могли бы быть использованы вследствие того, что дороги наши по своему пути и подвижному составу не рассчитаны на такие скорости, и, следовательно, далеко не всегда могла бы быть использована полная мощность такого тепловоза, развиваемая им только при больших скоростях.

Итак, мы видим, что тепловоз, в котором имеется неизменная кинематическая связь между валом двигателя и ведущими осями, обладает тяговой характеристикой, совершенно отличной от тяговой характеристики паровоза. Отсюда следует вывод, что или 1) с введением тепловозной тяги, осуществляемой такими тепловозами, не имеющими каких-либо устройств для увеличения силы тяги на малых скоростях, должен быть изменен существующий режим эксплуатации железных дорог, приспособленный сейчас к обслуживанию дорог паровозами, или же 2) тепловоз должен быть приспособлен к этому режиму.

Итти по первому пути, очевидно, невозможно; поэтому приходится избрать второй путь.

Приспособление тепловоза к существующему режиму эксплуатации железных дорог может быть осуществлено несколькими способами:

1) применением обычных двигателей такой большой мощности, которая позволяла бы без особо значительных перегрузок развивать необходимые при езде на тяжелых подъемах и при трогании с места максимальные тяговые усилия;

2) специальной конструкцией двигателей, приспособленных к значительным перегрузкам за счет увеличения количества рабо-

чего воздуха, как это запроектировано, например, в двигателе проф. В. И. Гриневецкого;

3) применением комбинации первых двух способов;

4) введением какого-либо добавочного процесса, повышающего мощность двигателя, например, комбинации двигателя внутреннего сгорания с паровым котлом, как это применено Стилом на теплоходе;

5) введением между двигателями и ведущими осями тепловоза какой-либо передачи с переменным отношением скоростей, позволяющей при трогании с места и малых скоростях тепловоза иметь достаточно высокие числа оборотов и мощность его первичного двигателя.

Отказываясь от детального описания первых 4 способов, которое заняло бы слишком много места, отметим, что все эти предложения можно грубо разбить на две группы. Авторы предложений первой группы, исходя из тех соображений, что всякая передача с переменным отношением скоростей, вследствие появления потерь в этой передаче, ухудшает коэффициент полезного действия тепловоза и значительно повышает его вес и стоимость, настаивают на сохранении неизменной кинематической связи между двигателем и ведущими осями, а для увеличения силы тяги на малых скоростях предлагают разнообразные устройства.

Однако, недостатки таких тепловозов, не имеющих передачи с переменным отношением скоростей, весьма значительны. Большой вес и стоимость тихоходного дизеля, большие максимальные усилия и потому большой вес механизма, передающего усилия от двигателя к осям, трудности в уравнивании инерционных воздействий возвратно-поступательно движущихся частей; в размещении двигателя относительно рамы; в сложности и многочисленности распределительных органов, в затруднительности и неэкономичности пуска в ход и разгона сжатым воздухом (в особенности при частых остановках); в обязательном применении добавочного агрегата большой мощности в виде двигателя с компрессором; в сложности устройства в тех случаях, когда для увеличения силы тяги на малых скоростях вводятся какие-либо дополнительные процессы (как, например, в проекте проф. Ядова, где предусмотрено до трех различных паровых котлов).

Как видим, перечень недостатков предложений первой группы, и недостатков серьезных, настолько велик, что авторы предложений второй группы — сторонники применения передач с пере-

менным отношением скоростей, — повидимому, имеют больше шансов на успешное решение задачи.

При наличии такой передачи имеется возможность применять в тепловозах современные быстроходные, более легкие и компактные двигатели, что весьма благоприятно отзывается на размерах, весе тепловоза и его стоимости, а также позволяет устанавливать двигатель внутри кузова тепловоза: Вследствие последнего обстоятельства улучшаются условия работы двигателя и обеспечивается возможность непрерывного контроля над работой двигателя на ходу тепловоза. Далее, если передача достаточно гибка, т.е. допускает плавное изменение передаточного числа, получается возможность заставить двигатель работать все время при наиболее выгоднейшем числе оборотов, т.е. при высшем коэффициенте полезного действия, что окупает с избытком потери в передаче. Наконец, эластичная передача позволяет работать двигателю на малых числах оборотов, когда от него требуется малая мощность, и даже останавливать его при ходе под уклоны и на подходах к станциям, чем значительно сокращается расход смазки и изнашивание двигателя, т.е. удешевляется его эксплуатация. Эти соображения, подкрепленные приведенным выше перечнем недостатков тепловоза без передачи, решают вопрос, на наш взгляд, в пользу тепловозов с передачей.

Теперь рассмотрим вкратце типы передач. Первый четырехсильный тепловоз завода Даймлера был построен с передачей в виде автомобильной коробки скоростей. Однако, осуществление такой коробки для мощной машины до последнего времени представляло непреодолимые затруднения, и конструкторская мысль работала над применением к тепловозу самых разнообразных передач: воздушной, гидравлической, газовой, электрической. Лишь в последние годы (1923—1924), в связи с общим прогрессом техники изготовления зубчатых колес, вновь выдвинулись на сцену проекты тепловозов с передачей в виде коробки скоростей. Такая именно передача, только с заменой обычных в автомобилях механических фрикционных сцепных устройств электромагнитными муфтами, изготовлена заводом Круппа и поставлена в настоящее время на тепловозе Юм, построенном в Германии по заказу Советского правительства под руководством проф. Ломоносова. Коэффициент полезного действия этой системы весьма высок, но гибкость, повидимому, недостаточна.

При воздушной передаче первичный двигатель тепловоза работает на компрессор, накачивающий в специальный резервуар сжатый воздух, которым уже и приводятся в действие вторичные поршневые двигатели, соединенные с ведущими осями тепловоза;¹ передача эта весьма гибка и эластична, но при этом коэффициент полезного действия тепловоза составляет лишь 7—8%, т. е. не больше, чем в паровозе.

Необходимо отметить, что помимо относительно большого расхода топлива, следствием низкого коэффициента полезного действия передачи является увеличение требуемой мощности первичного двигателя.

Гидравлическая передача заключается в том, что на вал первичного двигателя (двигателя внутреннего сгорания) насаживается насос, который гонит жидкость во вторичный, гидравлический двигатель, работающий уже на ведущие оси тепловоза. Известные гидравлические передачи Ленца, Феттингера, Дженни и другие позволяют осуществить плавное изменение передаточного числа в широких пределах.

При этом вся энергия первичного двигателя переводится в энергию движущейся жидкости (обычно масла), и затем эта энергия передается вторичному двигателю. Коэффициент полезного действия такой системы представляет произведение коэффициентов двух гидравлических машин и трубопровода.

Совершенно особое место занимает появившаяся в 1924—25 г. передача Шнейдера. В ней кожух ротационного (поршневого 6-ти цилиндрического) насоса связан конической зубчатой передачей с холостым валом локомотива. Ротор вторичного двигателя (такой же по типу машины, как и первая) соединен цилиндрическими зубчатыми колесами с тем же холостым валом. Таким образом здесь имеется механическая связь между двумя гидравлическими машинами. Благодаря такому устройству получают следующие периоды работы передачи Шнейдера.

1. Когда тепловоз стоит, кожух первичной машины неподвижен, и она целиком исполняет функцию гидравлического насоса, дающего максимальное давление (соответствующее максимальному тяговому усилию), которое сдвигает с места поршни вторичного двигателя, приводящего в движение холостой вал и оси тепловоза.

¹ См. описание такого тепловоза: „Engineer“ 1912, January, 12.

II. Когда движение тепловоза началось, но не достигло еще максимальной скорости, кожух первичной передачи вращается, и потому часть работы передается непосредственно им через зубчатки холостому валу, и только часть работы передается гидравлически. При этом, чем выше скорость тепловоза, тем меньшая часть работы передается гидравлически.

III. Наконец, когда скорость движения тепловоза достигла максимума, движение жидкости в первичной передаче прекращается клапаном, поршни жестко соединяются с цилиндрами, чем достигается прямое механическое соединение первичного (теплого) двигателя с холостым валом (или осями) тепловоза.

Поэтому передача Шнейдера только при трогании с места работает как чисто гидравлическая, на малых скоростях как смешанная, а на максимальной скорости она является уже чисто механической. Благодаря такому устройству коэффициент полезного действия этой передачи на максимальной скорости превышает 90%, и на промежуточных скоростях он выше всех остальных гидравлических передач.¹

Следует отметить, что гидравлические передачи типа Ленца и Джеяни страдают весьма крупным недостатком — непостоянством коэффициента полезного действия, который быстро падает по мере износа передачи, в связи с неизбежно появляющимися при этом пропусками в различных уплотнениях и соединениях. Вторым крупным недостатком этих передач — жесткость, обусловленная отсутствием упругости в рабочем теле (жидкости). В силу этой жесткости гидравлические передачи плохо переносят перемены в нагрузке, неизбежные при работе тепловоза с поездами, и известно несколько случаев серьезных аварий тепловозов, работавших с такими передачами. Так, например, у одного из шести тепловозов с гидравлической передачей системы Ленца, заказанных германскими дорогами заводам Линке-Гофман в Карлсруэ в последние годы (а именно, у маневровой машины мощностью всего в 175 HP), передача окончательно выбыла из строя после пробега меньше 100 km, после чего, насколько известно, был поднят вопрос о замене и на остальных пяти тепловозах передачи Ленца какой-либо иной передачей.

В качестве яркого образца газовых или компрессорных передач следует указать на оригинальную передачу системы инж.

¹ См. V. D. I., 1925 г., № 16. с. 499.

А. Н. Шелест, предложившего снабдить тепловоз двумя двигателями, из коих первичный двигатель (внутреннего сгорания) устанавливается в кузове тепловоза и, заменяя по существу дела паровозный котел, должен служить лишь для превращения топлива в газы и для проталкивания этих газов в резервуар; вторичный двигатель, представляющий полное подобие паровозной машины, кинематически с первым не связанный, устанавливается на раме тепловоза и должен работать полученными из резервуара газами.

На основании теоретических соображений проф. Гриневецкий оценивал коэффициент полезного действия такого тепловоза в 21—22%. Позднейшие теоретические подсчеты проф. Ошуркова и др. устанавливают к. п. д. лишь в 15—18%; однако, ни та ни другая цифры не могут быть признаны достоверными, т. к. именно с теоретической стороны система Шелеста, наименее изучена. Своеобразный процесс первичного двигателя внутреннего сгорания, превращающего топливо в газ при условиях, значительно отличающихся от соответственных условий в обычных двигателях, представляет и с термодинамической и с технической точек зрения ряд вопросов, требующих тщательного теоретического и опытного изучения. Отсутствие исчерпывающих ответов на эти вопросы не позволяет судить о газовой передаче Шелеста с какой-либо степенью уверенности в возможности осуществления тепловоза по этой системе. Те же соображения могут быть высказаны и о тепловозе системы проф. Мазинга, весьма близком по принципу работы к системе инж. Шелеста.

Вследствие ряда сомнений и отсутствия экспериментальных данных по самим процессам компрессорных передач, Тепловозная комиссия при НКПС пришла к заключению о необходимости отложить постройку тепловозов с компрессорной передачей и приступить к предварительному опытному изучению рабочих процессов.

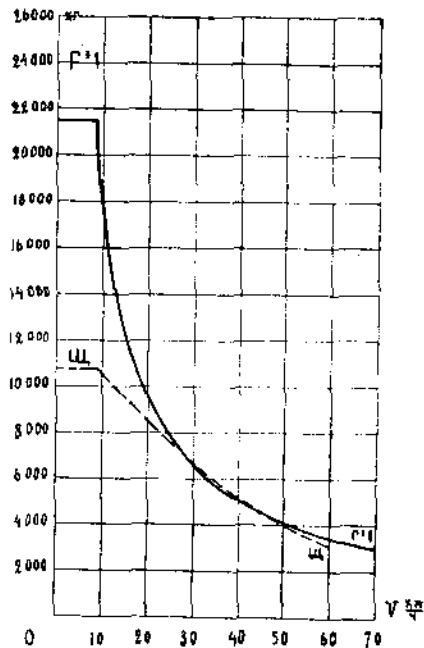
При электрической передаче первичный двигатель тепловоза работает на один или несколько электрических генераторов, питающих один или несколько электромоторов, сцепленных тем или иным способом с ведущими осями тепловоза.

Регулирование силы тяги электро-тепловозов осуществляется путем регулирования напряжения генераторов и, отчасти, изменением числа оборотов первичного двигателя. В общем, при электрической передаче тепловоз превращается в электровоз, несущий на себе свою электрическую станцию с двигателем внутреннего

сгорания, со свойственной обычному электровозу тяговой характеристикой, вполне отвечающей наиболее высоким требованиям, которые могут быть предъявлены к локомотиву.

Для иллюстрации последнего положения на фиг. 3 приведена тяговая характеристика тепловоза Г21 с электрической передачей, отвечающая нормальной мощности $T_{н.г.а}$

установленного на этом тепловозе двигателя Дизеля, и тяговая характеристика товарного паровоза Щ при форсировке котла $Z=50$. Из рассмотрения фигуры 3 видно, что в то время как при средних скоростях, порядка 25—50 km/h , обе машины развивают, примерно, одинаковое тяговое усилие и, следовательно, по мощности, примерно, эквивалентны, — при малых скоростях тепловоз с электрической передачей развивает гораздо большие, чем соответственный паровоз тяговые усилия, вследствие чего мы имеем возможность, при той же средней мощности локомотива, при помощи тепловоза проводить по наиболее тяжелым участкам профиля большие составы и легче и быстрее



Фиг. 3.

осуществлять трогание с места и разгон после остановок.

Электрическая передача является наилучшей из всех существующих в настоящее время в смысле гибкости, надежности и простоты управления. Число оборотов первичного двигателя совершенно не зависит от скорости тепловоза и всегда может поддерживаться наиболее выгодным. Пуск в ход первичного двигателя происходит без нагрузки. Коэффициент полезного действия тепловоза с электрической передачей уже определен испытаниями и колеблется от 22 до 25,5%.

Управление тепловозом при электрической передаче чрезвычайно просто и надежно осуществляется помощью небольшого контроллера, который позволяет плавно регулировать силу тяги тепловоза от нуля до максимума. В частном случае, снабдив

тепловоз, при обычной электрической передаче на постоянном токе, аккумуляторной батареей, мы получаем еще целый ряд преимуществ. Так, путем превращения генератора (или одного из них, если их несколько) в электромотор, питаемый от аккумуляторной батареи, мы получаем простой и быстрый пуск в ход первичного двигателя. Подобный способ применен в тепловозе Г²1 для разворачивания установленного на этом тепловозе 1000-сильного бескомпрессорного двигателя Викакса. Как показал опыт, пуск двигателя по этому методу требует от 3 до 5 сек. и расхода энергии аккумуляторной батареи в количестве не свыше 0,5 кВт/ч.

Столь легкий пуск позволяет совершенно останавливать двигатель во всех тех случаях, когда можно предвидеть, что в течение некоторого, даже небольшого промежутка времени — 15—10 минут — работа двигателя окажется ненужной.

Рассмотрим для сравнения механическую передачу — с коробкой скоростей, главным преимуществом которой является большой коэффициент полезного действия.

Для передачи, установленной на тепловозе Ю², Крупп гарантировал 96% против 80—85%, имеющих место при электрической передаче на уже работающих тепловозах Г²1 и Ю²001. Второе преимущество — меньшая, примерно, на 25% стоимость тепловоза с передачей по типу коробки скоростей.

Однако, здесь необходимо принять во внимание следующие отрицательные качества коробки скоростей: во-первых, невозможность вести тепловоз с любой заданной скоростью, т. к. скорости тепловоза, промежуточные между основными его скоростями, даваемыми коробкой скоростей, могут быть получены лишь за счет понижения числа оборотов первичного двигателя, т.-е. за счет уменьшения его мощности; во-вторых, самый переход от одного режима к другому [всякий раз заставляет снимать тягу до нуля, что при малейшем ослаблении внимания машиниста ведет к разрыву состава поезда.

Мы полагаем, что для тяги товарных поездов тепловоз с коробкой скоростей не привьется. В этом нас убеждает еще одно обстоятельство. До последнего времени передачи типа коробки скоростей имели исключительное распространение в автомобильном деле, и никаких перемен в этой области не предвиделось. На деле же оказалось, что и здесь электрическая передача завоевывает себе место. В статье „Philadelphia Coordinates Bus and Rail“, помещенной в „Electric Railway Journal“

в № от 8 августа 1925 г., имеются сведения о том, что уже 2 года тому назад часть автобусов, принадлежавших Philadelphia Rapid Transit Company, была переделана путем замены механической передачи от бензинового двигателя к задним полуосям (дифференциала и коробки скоростей) электрической передачей в виде генератора постоянного тока, непосредственно соединенного с валом бензинового мотора, и двух электродвигателей, каждый из которых в отдельности сцеплен с одним из задних колес помощью зубчатой передачи. Последующими испытаниями было установлено, что переделанные автобусы дали в работе лучшие результаты, чем непеределанные, показав: большую плавность при трогании с места и изменении скоростей, большее ускорение при пуске, меньший удельный расход топлива и больший пробег, вследствие чего та же компания решила все свои автобусы снабдить электрической передачей. По последним сведениям (E. T. Z., ноябрь 1926 г.) уже 25% всех автобусов в Америке снабжены электрической передачей, заменившей коробку скоростей. Приведенный факт, конечно, не может служить прямым доказательством выгоды электрической передачи на тепловозах; однако, он лишней раз подчеркивает, что не всегда более высокий коэффициент полезного действия парадного испытания и дешевизна дают наилучшие результаты, и что электрическая передача дает практические выгоды, проистекающие от качественного улучшения работы механизмов вследствие эластичности, плавности изменения скорости, быстроты и простоты управления.

Наконец, в последнее время в литературе появились сведения о мощных американских тепловозах, из коих один (см. Railway Age, 1925, № 15, p. 645) построен паровозостроительным заводом Балдина, весит 125 *t* и развивает мощность в 1000 *HP*, а второй (см. El. Railway Journal, 1925, № 26, p. 1126) построен Американской локомотивной компанией для Long Island Railway, весит 100 *t* при 600 *HP*. В декабре 1925 г. в Нью-Йорке состоялась дискуссия на тему об областях применения тепловоза, в которой приняли участие виднейшие представители паровых и электрических железных дорог. Дискуссия единогласно установила бесспорное преимущество, и техническое и экономическое, тепловоза с электрической передачей для маневровой службы на больших ж.-д. узлах и сортировочных станциях. То обстоятельство, что американцы, с их богатым техническим опытом, строят свои тепловозы именно с элек-

трической, а не с какой-либо иной передачей, еще более убеждает нас в том, что при современных условиях электрическая передача является для тепловозов действительно наилучшей.

Что же могут дать в эксплуатационных условиях такие тепловозы?

Опытные поездки с русским тепловозом Г₂1 и с тепловозом германской постройки Ю²001 показали, что тепловозы расходуют топлива, в среднем, в 3 раза меньше, чем паровозы Э при прочих равных условиях. Противники тепловозов тотчас же подчеркивают, что за то тепловоз, вместо относительно малоценного на рынке угля, которым могут отапливаться паровозы, расходует более ценное нефтяное топливо.

Однако, это возражение не имеет существенного значения, так как значительная часть паровозов работает на нефтяном топливе, следовательно, во всяком случае, имеются все основания ставить вопрос о замене тепловозами неэкономно работающих на этом топливе паровозов.

Кроме того, не следует забывать, что в Германии уже умеют из бурых углей, торфа и подобных малоценных сортов топлива добывать „Ersatz-Oel“ — суррогат нефти, вполне пригодный для отопления двигателей внутреннего сгорания, и надо надеяться, что и у нас это дело получит надлежащее развитие.

По статье расходов на топливо, составляющей на дорогах, обслуживаемых паровозами, до 17%, всех эксплуатационных расходов, введение тепловозной тяги должно дать сбережения от 60 до 65%, в зависимости от местных условий.

Полный ответ на вопрос о выгоде тепловозной тяги на том или ином участке может быть дан только после подсчета всех косвенных и эксплуатационных расходов для сравниваемых родов тяги в данных условиях.

Подробное рассмотрение подобных подсчетов завело бы нас слишком далеко. Отметим лишь, что влияние относительно высокой стоимости тепловоза, которая, очевидно, понижает шансы тепловоза при сопоставлении его с паровозом, в значительной мере смягчается большим годовым пробегом тепловоза. Как известно, годовой пробег товарного паровоза серии Э в среднем составляет для наших дорог в настоящее время 30 000 *km*. Между тем и по расчетам авторитета в вопросах железнодорожной экономики, Н. К. Мекк, и по результатам опытной эксплуатации, годовой пробег тепловоза может быть доведен до 85 000 *km* в предполо-

жении, что 60 дней в году тепловоз стоит в ремонте. Причины ясны: в тепловозе нет парового котла, и, следовательно, нет траты времени на растопку, на промывку, на относительно частый ремонт вследствие течи труб. Кроме того, тепловоз может совершать бесшумные пробеги во главе поезда минимум по 500—550 *km*, так как весь необходимый за время такого пробега осмотр и смазка могут быть сделаны частью на ходу, а частью на промежуточных и распорядительных станциях, между тем как товарный паровоз через каждые 150—175 *km* обычно идет в депо для чистки и осмотра. Следовательно, благодаря большому пробегу один тепловоз заменяет по меньшей мере 2 паровоза, и потому более высокая стоимость тепловоза по сравнению с паровозом, перестает быть такой устрашающей, в особенности, если учесть, что при массовой постройке тепловозов стоимость их несомненно значительно понизится.

Инженером В. А. Тимофеевым произведены подсчеты по сравнению себестоимости товарных перевозок при тепловозной, электрической и паровой тяге на участке Зестафони-Хашури (Михайлово-Квирилы) Закавказских жел. дорог, на котором расположен известный Сурамский перевал с подъемами до 30⁰/₀₀, иными словами, на участке, очевидно наиболее выгодном для электрической тяги, т. к. здесь легко осуществить рекуперацию энергии, дающую при таких тяжелых подъемах значительные сбережения. Столь же очевидно, что для тепловоза (по сравнению с паровозами) участок этот, — длиной всего 63 *km*, — не выгоден, так как малая его длина не позволяет использовать отмеченную выше способность тепловоза к бесшумному пробегу с поездом на большие расстояния.

При вычислении себестоимости перевозок на этом участке инж. Тимофеев исходил из следующих предположений:

1) При тепловозной тяге участок обслуживается машинами типа 1—5—1 Г²14, с общим весом на ходу 102 *t* и со сцепным весом 80 *t*, с двумя двигателями Дизеля мощностью $2 \times 600 \text{ HP} = 1200 \text{ HP}$ и средним коэффициентом полезного действия электрической передачи в 80⁰/₀.

2) При электрической тяге (на трехфазном токе) обслуживание участка предполагалось вести электровозами типа 0—5—0 весом 100 *t*, с часовой мощностью 2100 *HP*, синхронная скорость которых равна 33 *km* в час.

3) При паровой тяге был намечен паровоз E^{Φ} , развивающий при форсировке котла $Z=40$, при скорости 18 *km* в час, около 1060 *HP* на обode; топить паровоз предполагалось мазутом.

Стоимость тепловоза была принята равной 350 000 руб., электровоза — 150 000 руб. и паровоза 112 000 руб., т. е. для тепловоза и паровоза были приняты их современные русские цены, а для электровоза — цена, сообщенная заграничными заводами по запросам НКПС.

При вычислениях расходы по отдельным статьям выражались в виде функции от интенсивности движения, измеряемой дробью, числитель которой представляет количество тонно-километров, сделанных на участке грузами обоих направлений, а знаменатель — длину участка в километрах. Подобный метод позволил и окончательную формулу для себестоимости одного миллиона тонно-километров (или, по соответственном переводе в русские меры, миллиона пудо-верст) представить для каждого рода тяги в виде функций от интенсивности движения.

Исследование этих формул приводит к следующим выводам. В области небольших сравнительно размеров товарного движения (до 75 и 90 миллионов пудо-верст на версту при цене электрической энергии соответственно в одну и три копейки за киловатт-час) электрическая тяга дает себестоимость более высокую, чем при тепловозной и паровозной тяге. Бесспорное преимущество электрической тяги над тепловозной начинается в области больших грузооборотов при интенсивности товарного движения 130 и 160 миллионов пудо-верст на версту, соответственно при дешевой и дорогой энергии; преимущество электрической тяги над паровой начинается несколько раньше. Причины такого соотношения ясны: при относительно малых грузооборотах расходы по содержанию неподвижного электрического оборудования (линии передачи, подстанций, контактного оборудования), которое должно быть рассчитано на удовлетворение возможного при данных условиях максимума движения, ложатся тяжелым бременем на себестоимость единицы перевозок. Сопоставление же тепловозной и паровой тяги указывает, что *при цене нефти выше 30 коп. за пуд, тепловозная тяга оказывается при всех грузооборотах выгоднее паровозной.*

Следовательно, даже на таком участке, как Зестафони-Хашури Закавказских ж. д., который по своим свойствам наименее выгоден для тепловоза, последний в большинстве случаев дает более дешевую себестоимость единицы перевозок, чем электровоз или паровоз, работающий на нефтяном топливе. Правда, нельзя не отметить, что экономические подсчеты для тепловозной тяги, выполненные до получения надлежаще полного комплекса сведений о работе тепловоза в нормальных эксплуатационных условиях,

подлежат дальнейшему уточнению по мере поступления названных сведений. Тем не менее, даже и при настоящем положении этого вопроса можно и должно говорить об экономичности замены паровозов, работающих на нефтяном топливе, тепловозами, и о необходимости широкой постановки опытов в этой области.

О том, что тепловоз является чрезвычайно удобной и выгодной тяговой машиной в районах безводных, где снабжение паровозов водой представляет большую статью расхода, как, например, на Ташкентской дороге, не приходится говорить.

Попутно остановимся еще на одном весьма важном обстоятельстве, связанном косвенно с водоснабжением. Обычно противники электрификации того или иного участка указывают, что в случае



Фиг. 4.

войны такой электрифицированный участок весьма легко вывести из строя, разрушив какую-либо существенную часть устройств, питающих этот участок электрической энергией, и что поэтому всякий электрифицированный участок должен иметь все устройства, необходимые для паровой тяги, т.-е. надлежащее водоснабжение, места для хранения и подачи топлива на паровозы и проч. Мы уверены, что с появлением на рельсовых путях достаточного количества тепловозов, для которых расстояние между депо-скими станциями может быть принято минимум в 500 — 550 *км*, и которым никакого решительно оборудования на промежуточных между депо станциях не нужно, затронутый выше вопрос о способах создания резерва для электрифицируемых линий совершенно отпадет.

Возвратимся, однако, к экономическим подсчетам. Вычисления инженера Тимофеева были проделаны в предположении, что тепловоз Г₂14 ставится для работы на уже существующую дорогу,

при проектировании которой о тепловозах не было речи. Между тем в некоторых отношениях, как мы видели, тепловоз достаточно резко отличается от паровоза, и, следовательно, технические условия на сооружение дорог при тепловозной тяге должны отличаться от соответственных условий при паровозной тяге.

Н. К. Мекк уже дал проект таких условий, указав в числе наиболее существенных следующие отличия. При тепловозной тяге длина непрерывного уклона может быть повышена до 22 *km* против 10 *km* при паровозной тяге, депо можно располагать через 500 *km*, устройства для подачи воды и топлива на паровозы на промежуточных станциях не нужны.

Исходя из этих условий, Н. К. Мекк на примерном подсчете установил, что при сооружении в средних русских условиях дороги протяжением в 1500 *km* замена паровозной тяги тепловозной понизит строительную стоимость дороги (включая и стоимость подвижного состава) со 132000 рублей до 114000 рублей, т. е. даст экономию в 14% при ценах на тепловоз типа Ю^э 225000 рублей и паровоза Э — 85000 рублей.

Итак, можно считать установленным, что тепловоз с электрической передачей представляет собой практически пригодную тяговую машину, которая во многих случаях дает экономически лучшие результаты, чем другие локомотивы.

Однако, говорить о том, что тепловоз в современном его виде может отовсюду вытеснить паровоз, было бы по меньшей мере преждевременно. Приводя выгодные для тепловоза результаты подсчета инженера Тимофеева, мы всюду старательно оговаривались: тепловоз по сравнению с паровозом, работающим на нефтяном топливе. При сравнении тепловоза с паровозом, работающим на угле, результаты получаются несколько иные: если принять, что уголь в 4 раза дешевле нефти, а в угольных районах такое соотношение имеет место, — то окажется, что денежная экономия на топливе при современной стоимости тепловозов может оказаться недостаточной, чтобы компенсировать их высокую стоимость.

О том, что при известных условиях электрическая тяга несомненно выгоднее тепловозной, мы также говорили. Следовательно, для каждого типа локомотива — тепловоза, паровоза, электровоза — имеется своя область работы на транспорте. Наилучшим образом использовать на этой работе новое тяговое орудие — тепловоз — и является ближайшим заданием инженеру-тяговику.

НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ.

Инж. Р. А. Лютер.

Непрерывный рост мощности генераторных единиц в установках сильного тока, а также все возрастающие требования эксплуатации в отношении обеспечения непрерывности работы установок заставляют электротехнические заводы неустанно работать над проблемой усовершенствования конструкции генерирующих машин и защитных устройств для генераторов при явлениях короткого замыкания и перенапряжений.

Установка защитных устройств для генераторов главным образом предусматривает возможно быстрое отключение поврежденного генератора от рабочей системы; более второстепенную роль играют защитные устройства в генераторных схемах, защищающие генераторы при авариях элемента, лежащего вне генератора. Поэтому большая часть защитных устройств постольку необходима, поскольку всегда возможны аварии генераторов из-за недостаточной надежности в работе их в условиях эксплуатации. Здесь прежде всего интересно коснуться вопроса о тех обстоятельствах, которые влияют на надежность работы генераторов на месте установки, так как рассмотрение этих обстоятельств работы наиболее кратким путем приводит к выводам о необходимых защитных мерах.

Надежность в работе генераторов зависит от их первоначальных качеств при выпуске с завода и от условий эксплуатации на месте установки, ухудшающих в той или иной мере со временем качества изоляции машин. При состоянии фабрикации в настоящее время крупные мировые фирмы технически могут исполнить вполне обоснованное требование центральных станций, чтобы генераторы проработали без повреждений в течение срока службы около 20 лет. Для достижения такой надежности работы машин

требуется рациональная совместная работа конструктора машин и эксплуатирующих установку инженеров. Первоначальные качества генераторов определяются существующими нормами по испытанию электрических машин. В настоящее время эти нормы пересматриваются в комиссиях ЦЭС. Наиболее существенными пунктами норм являются вопросы о перегрузках, электрической прочности обмоток и допустимых перегревах.

Для правильной эксплуатации машин прежде всего необходимо отметить, что нормальная длительная мощность, на которую изготовлены генераторы и трансформаторы, представляет предельную мощность, которая может быть длительно получена от этих машин. Во всех существующих нормах, в том числе и международных, это положение легло в основу по вопросу о перегрузках и потому в нагретом состоянии машин практически допустимы лишь мгновенные перегрузки. Если в эксплуатации предусматривается возможность работы машины с длительной перегрузкой, то машины наиболее рационально заказать с соответственным запасом. Чрезвычайно существенным является также правильная оценка $\cos\varphi$ при заказе машины. Вообще следует отметить, что запас в 20—25% в мощности машины в случае возможных перегрузок в эксплуатации сильно повышает надежность работы машины в эксплуатации, между тем как эксплуатационный коэффициент полезного действия машины практически не изменяется, а стоимость машин возрастает на относительно малую величину.

Чрезвычайно существенным обстоятельством для надежной работы машин в эксплуатации является электрическая прочность обмоток и допущенные в них перегревы. Последними нормами Союза Германских Электротехников предписываются не только нормы для испытания изоляции по отношению к корпусу на пробивание, но также нормы для испытания изоляции между витками: испытание крутым фронтом волны и испытание на повышенное напряжение между витками. Практика последних пятнадцати лет бесспорно приводит нас к требованиям повышения электрической прочности в машинах, так как это является наиболее действительным средством защиты от динамических перенапряжений при процессах включения и выключения. В новых нормах, разрабатываемых ЦЭС, поэтому можно приветствовать появление повышенных требований к изоляции машин.

В отношении допустимых перегревов обмоток машин и трансформаторов существующие нормы различных стран, а в том числе

и международные, дают вполне надежные для эксплуатации допустимые цифры температурных перегревов, поскольку разница между наблюдаемой наибольшей температурой и действительно существующей температурой изоляции не превышает предполагаемой величины от 15—5° С. в зависимости от способа измерения температуры перегрева. В машинах с небольшою длиной железа (до 50 см) измерение температуры перегрева обмоток по сопротивлению и поверочно термометром дает достаточно надежные результаты. Несколько иначе дело обстоит с мощными генераторами, имеющими большую длину железа.

Для измерения наибольшей температуры нагрева в последнем случае американская практика рекомендует применение температурных детекторов, закладываемых внутри пазов в середине машины. Этот способ однако очень неточен, в особенности для обмоток катушечного типа и обмоток с одним стержнем на паз, так как при этом измеряется не максимальная температура меди обмотки и не средняя ее температура, а температура на поверхности изоляции, т.е. по существу температура железа. Так как для надежной работы генератора весьма существенно не переходить определенных пределов температур, допускаемых для данного класса изоляции, то приходится выразить надежду, что в ближайшее время будут найдены более совершенные способы измерения максимальных температур.

К сожалению статистика случаев повреждения генераторов ведется на практике недостаточно систематично, чтобы возможно было делать вполне определенные выводы. Несомненно, однако, что наибольшей опасности аварий подвергаются генераторы в установках больших мощностей с крупными сетями.

Наиболее часто встречающиеся повреждения генераторов могут быть классифицированы по причине повреждения следующим образом:

- 1) повреждения от коротких замыканий и заземлений в сети,
- 2) повреждения от перенапряжений преимущественно атмосферного происхождения или вследствие пробоев в трансформаторах высокого напряжения,
- 3) повреждения изоляции вследствие явления старения изоляционных материалов,
- 4) повреждения изоляции роторов,
- 5) повреждения вследствие недостатков конструкции или производства на заводе.

В октябрьском номере известий AEG-Mitteilungen (Н. 10, 1925) инженер Поля приводит интересное обследование аварий с турбогенераторами AEG за двадцатилетний период времени, в течение которого фирмой было выпущено около 2600 турбогенераторов. В обследовании приводятся 24 случая повреждений.

Из них:

7 относятся, хотя и не вполне определенно, но наиболее вероятно, к классу I повреждений,

4 к классу II,

2 " " III,

6 " " IV,

1 " " V.

Из остальных четырех случаев — три случая легкого механического повреждения роторов, а один случай крупной аварии имел место вследствие саботажа, точно установленного при расследовании.

Относящиеся к первому классу семь повреждений произошли в связи с короткими замыканиями и заземлениями в сети, при чем возможно, что некоторое влияние оказали и имевшие при этом место перенапряжения. Четыре случая установлены на крупных центральных станциях, три случая имели место на заводских установках. Часть повреждений, по мнению инженера Поля, безусловно объясняется тем, что усыхание изоляции лобовых частей обмотки вызвало слабину в креплении их и таким образом утратилась устойчивость обмотки при коротких замыканиях; повторные короткие замыкания, постепенно деформируя обмотку, в конце концов вызвали пробивание изоляции. При периодических осмотрах турбогенераторов весьма существенно соответственным подтягиванием крепящих обмотку болтов ликвидировать возникшую слабину крепления обмотки.

Относящиеся ко второму классу — четыре случая повреждений по данным инженера Поля бесспорно вызваны перенапряжениями в связи с атмосферными явлениями или вследствие пробоев в трансформаторах высокого напряжения, при чем во всех четырех случаях отсутствовали особые защитные устройства от перенапряжений. Как для повреждений класса I, так и для повреждений класса II, следует отметить относительно большой процент (около 60%) случаев, сопровождавшихся большим пожаром в генераторе. Это объясняется, с одной стороны, отсутствием на установках, где произошла авария, достаточно надежно дей-

ствующих релэ, отключающих поврежденный генератор и ослабляющих его возбуждение, и, с другой стороны, отсутствием надежных тушителей пожара в генераторе.

Повреждения по классам III и IV изоляции статоров и роторов вследствие явления старения в эксплуатации своевременно обнаруживались и не вызвали крупных аварий генераторов. Явления старения изоляции, по всей вероятности, при доброкачественности материалов, примененных заводом в дело и правильном расчете и конструкции объясняется воздействием на изоляцию ненормально высоких температур. Ненормальные перегревы обмоток могут явиться как следствием чрезмерных перегрузок в работе, так и следствием нарушения правильной вентиляции машин вследствие, например, загрязнения вентиляционных каналов ротора.

Из приведенных в статистике AEG турбогенераторов, выпущенных за 20 лет, по всей вероятности работают около $\frac{2}{3}$ всех установленных машин, при чем сравнительно небольшой процент генераторов работает на станциях с крупными сетями. Этим объясняется относительно малое количество повреждений, приведенных в статистике. В практике крупных станций в Москве и Ленинграде бывали неоднократные аварии с обмотками турбогенераторов, по всей вероятности, преимущественно в связи с явлениями коротких замыканий и перенапряжений в сети.

Переходя к вопросу о защитных устройствах для генераторов, приходится, как это следует из описанных повреждений, уделить особое внимание защитным мерам от токов короткого замыкания и перенапряжений, а также мерам, ограничивающим степень повреждения машин, чтобы ремонт на месте можно было бы легко произвести в несколько дней.

Как известно, при коротком замыкании синхронной машины на зажимах в первые доли секунды получают мгновенные токи короткого замыкания, значительно превышающие устанавливающиеся впоследствии токи короткого замыкания. Мгновенный ток короткого замыкания определяется величиною существующего в машине в момент короткого замыкания магнитного поля, величиною индукционного сопротивления от полей рассеяния статорной обмотки и моментом короткого замыкания; последнее обстоятельство влияет на симметрию положения синусоиды мгновенного тока короткого замыкания для рассматриваемой фазы по отношению к нулевой линии; при самом неудачном положении рас-

смаатриваемой фазы в момент короткого замыкания синусоида мгновенного тока короткого замыкания в течение первого периода целиком располагается по одну сторону линии нулевых значений тока и через полпериода получается наибольшее значение так называемого несимметрического тока короткого замыкания.

Если обозначить через E_s — электродвижущую силу, индуцируемую на фазу полями рассеяния в статоре при обтекании обмотки статора нормальным током и через E обозначить нормальное фазовое напряжение, то кратность мгновенного несимметрического тока короткого замыкания J_m по отношению к нормальному току J_n в фазе составит

$$\frac{J_m}{J_n} = \frac{E}{E_s} \cdot 1,8.$$

Рю ден берг, путем исследований выполненных генераторов, показал, что в эту формулу для E_s следует подставлять:

для машин с ясно выраженными полюсами величину того напряжения, которое необходимо приложить к статорной фазе при вынутом роторе для того, чтобы получить нормальный ток в обмотке,

для машин турбогенераторного типа напряжение как выше, но за вычетом части напряжения, уравновешиваемой вращающимся полем (Bohrungsfeld).

Современные генераторы строятся с достаточно большой величиной E_s , так что кратность мгновенного тока не превышает 15.

При коротких замыканиях в сети для расчета мгновенного тока короткого замыкания приходится учесть комбинированное сопротивление на фазу сопротивлений от полей рассеяния генераторов и внешних реактивных сопротивлений, включенных между генератором и местом короткого замыкания, т.-е. реактивных сопротивлений трансформаторов, линий, катушек и т. д.

На величину мгновенного тока короткого замыкания относительно малое влияние оказывает, произошло ли короткое замыкание между всеми тремя фазами или же между двумя фазами или, наконец, между фазой и землей.

Получающийся мгновенный максимум тока вызывает весьма значительные механические напряжения во всех частях генератора. Хотя механически современные конструкции генераторов достаточно прочны, чтобы противостоять повреждениям при коротких замыканиях, но все же их следует щадить в эксплуатации

и потому для крупных сетей особенно рекомендуется применение реакторов на фидерах, столь распространенных в американской практике.

Величина установившегося тока короткого замыкания синхронной машины, как известно, растет с увеличением тока возбуждения. При коротком замыкании всех трех фаз на зажимах генератора установившийся ток короткого замыкания при возбуждении, соответствующем полной нагрузке, составляет от 1,5—3 нормального тока в зависимости от быстроходности и величины машины. При двухфазном коротком замыкании ток получается примерно на 80% выше, чем при трехфазном, а при однофазном — примерно на 160% больше, чем при трехфазном.

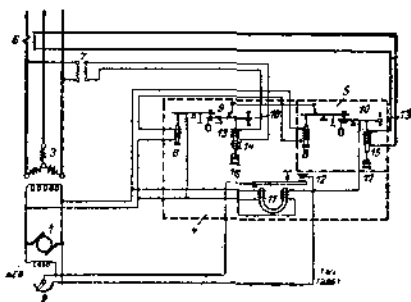
Наиболее действительной мерой для ограничения величины установившегося тока короткого замыкания является по возможности быстрое уменьшение возбуждения генератора при коротких замыканиях и в некоторых случаях полное размагничивание генераторов.

Эта мера не только понижает термические эффекты при коротких замыканиях, но и в значительной мере облегчает условия работы ответственных автоматических масляных выключателей и тем обеспечивает надежность действия выключателей.

Наиболее распространенным в практике способом уменьшения возбуждения генераторов является введение добавочного сопротивления в цепь возбуждения возбудителя при помощи особого релэ — ограничителя тока короткого замыкания.

При автоматическом регулировании возбуждения генератора при помощи периодически замыкаемого накоротко реостата в цепи возбудителя (например, регуляторы Тирилля) можно релэ-ограничитель включать так, чтобы это периодическое короткое замыкание реостата не имело места при коротких замыканиях, и реостат все время оставался бы включенным. (См. схему фиг. 1, AEG-Mitteilungen, 1925 г. Н. 7. S. 225.)

С релэ-ограничителем может быть также связана, в случае надобности, максимальная защита генератора с независимой от тока выдержкой времени.

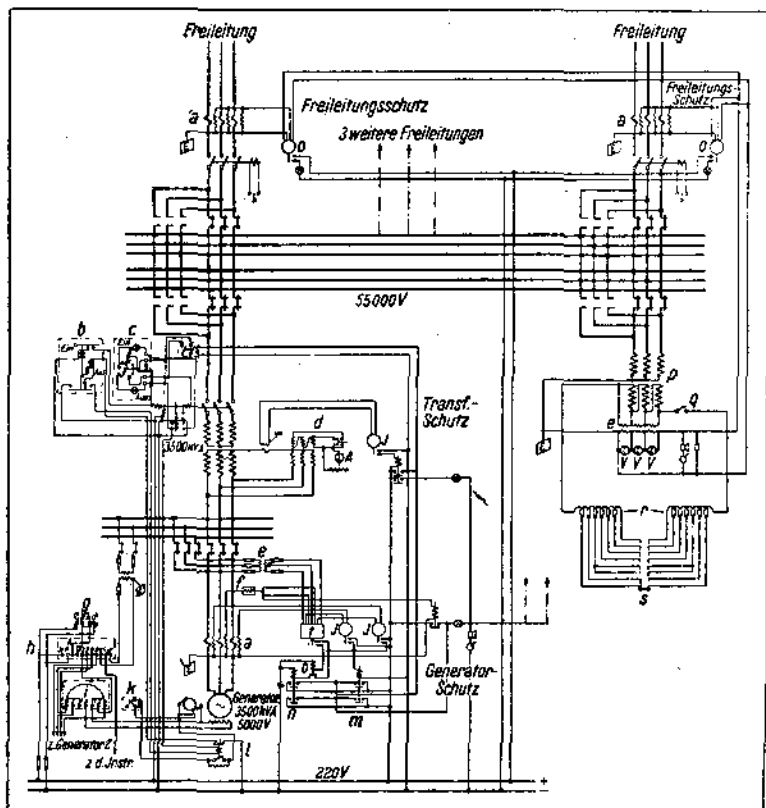


Фиг. 1.

Особенного внимания далее заслуживают защитные устройства, отключающие генератор, в котором появилось короткое замыкание на корпус или короткое замыкание между фазами.

Для выключения генератора при внутренних повреждениях, применяются три основные системы защитных релэ:

- 1) релэ обратной мощности, 2) дифференциальная защита,
- 3) балансовая защита.



Фиг. 2.

Freileitung — линия передачи. Freileitungsschutz — защита линий передачи. Transf.-Schutz — защита трансформатора. Generator-Schutz — защита генератора.

Защита при помощи релэ обратной мощности особенно детально разработана фирмой Сименс-Шуккерт (система Бауха, см. фиг. 2 Siemens Zeitschrift, Heft 3, S. 115). Главным недостатком релэ обратной мощности является ненадежность действия их при больших падениях напряжения. Для того, чтобы обеспечить возможно большую надежность действия защиты, фирма Сименс-

Шуккерт применяет релэ обратной мощности в комбинации с максимальным релэ с независимой от тока выдержкой времени, в качестве релэ, действующих на выдержку времени максимального релэ, а не в качестве релэ, управляющих выключением автоматов. Таким образом при реагировании релэ (при прямом направлении мощности) мгновенное выключение автомата заблокировывается, если же релэ (при обратном направлении мощности) не действует, то цепь мгновенного выключения автомата деблокирована. Релэ исполняется таким образом, что оно надежно действует при $1-2\%$ напряжения при двойном рабочем токе.

Значительное падение напряжения во всех фазах получается, однако, только при трехфазном коротком замыкании, т.-е. в сравнительно редких случаях. При двухфазном коротком замыкании надежность действия двухполюсного релэ обратной мощности обеспечена.

В отношении защиты генераторов при помощи релэ обратной мощности все же имеются значительные недостатки:

1) При работе с незаземленной нейтралью генераторов или нейтралью, заземленной через большое сопротивление, защита при помощи релэ обратной мощности не реагирует при заземлении одной точки обмотки. Между тем заземление одной точки обмотки обычно предшествует междуфазному короткому замыканию. Здесь требуются особые указатели заземления.

2) При работе одного генератора защита при помощи релэ обратной мощности вообще не действует при внутреннем коротком замыкании в генераторе.

3) Защита при помощи релэ обратной мощности действует недостаточно надежно в избирательном отношении при сильных падениях напряжения.

Вследствие таких недостатков, присущих системе защиты генераторов при помощи релэ обратной мощности, американской практикой и фирмой AEG в Германии выдвинута система защиты крупных генераторов дифференциальная, т.-е. путем сравнения сил токов в начале и в конце каждой фазы генератора. Систему эту легко применить и для совместной защиты генератора с повысительным трансформатором.

К недостаткам дифференциальной системы защиты генераторов относится то, что она не действует при витковом соединении в генераторе: однако витковое соединение в генераторах представляет явление весьма редкое и потому этот недостаток не так существен. Следует отметить, что в системах с нейтралью

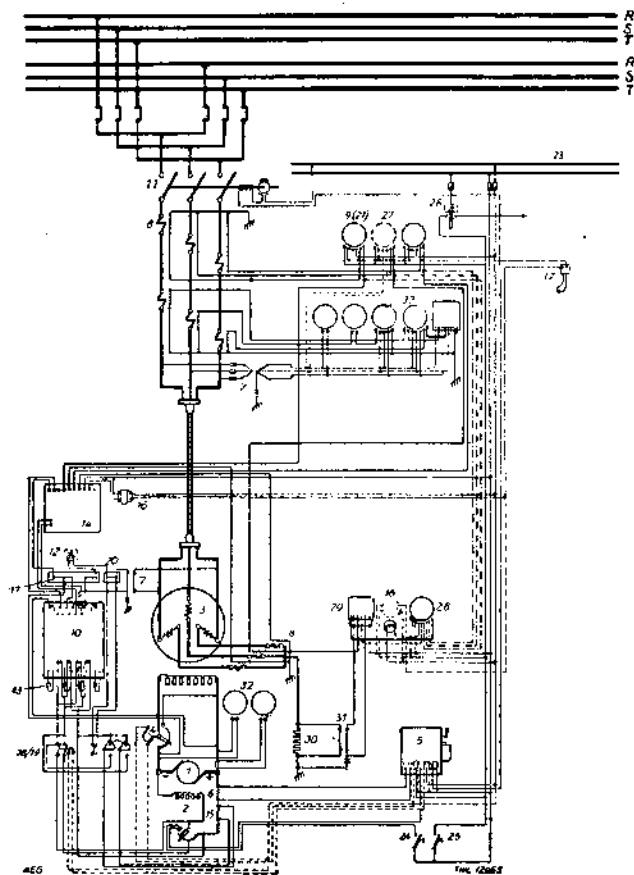
генератора, заземленной наглухо или через малое сопротивление, дифференциальная система при заземлении обмотки в одной точке действует значительно надежнее, нежели в системах с незаземленной нейтралью или нейтралью, заземленной через большое сопротивление. При незаземленной нейтрали генератора или при заземлении нейтрали генератора через большое сопротивление — в случае заземления обмотки генератора в одной точке ток в заземляющей дуге получается преимущественно емкостный и по величине зависит от напряжения системы и емкости на фазу всей металлически связанной с генераторной обмоткой системы. Значительной величины ток в заземляющей дуге достигает лишь при кабельных сетях большого напряжения, так как генераторное напряжение относительно низко. Если в установке применены гасительные катушки Петерсена или гасительные трансформаторы Бауха, то ток в заземляющей дуге уменьшается в такой значительной степени, что для обнаружения заземления требуется установка специальных релэ заземления, включаемых на трансформатор тока в заземляющем нейтраль генератора проводе.

Полная схема защиты генератора дифференциальным релэ и релэ заземления приведена на фиг. 3. (AEG-Mitteilungen, H. 7, S. 230.)

Весьма интересна предложенная впервые в Америке балансовая защита генераторов; балансовая защита основана на принципе сравнения токов в параллельных ветвях генераторной обмотки. При помощи этой защиты в самом зачатке обнаруживается также и витковое соединение в генераторной обмотке. Комбинируя дифференциальную защиту с балансовой, мы получаем идеальную защиту, особенно целесообразную при одновременной защите генератора и соединенного с ним повысительного трансформатора. Схема такой защиты для установки Hudson-Avenue-Brooklyn приведена на фиг. 4 (E. T. Z, 1925, S. 1140.)

Если в генераторе появляется изоляционный дефект, то даже при исправном действии защитных релэ, отключающих поврежденный генератор, возможность возникновения пожара обмотки не исключена. Большую роль в отношении предупреждения пожара обмотки играет быстрое размагничивание генератора. Простое выключение цепи возбуждения генератора не представляет удовлетворительного разрешения поставленного вопроса, так как в целях понижения получающегося при размыкании перенапряжения приходится предусмотреть параллельное сопротивление к выключаемой обмотке возбуждения или демферную систему на ро-

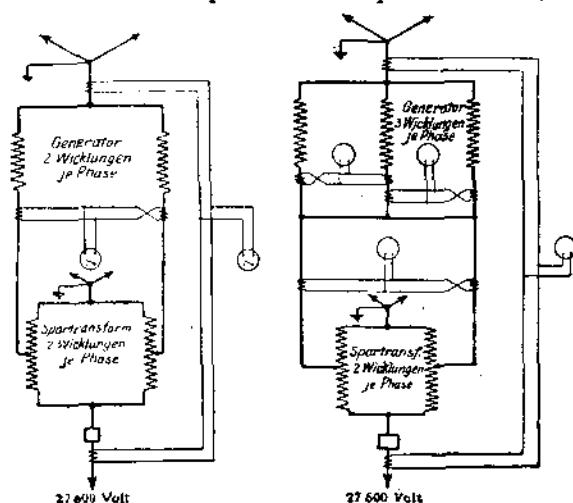
торе. То и другое вызывает замедление в исчезновении поля в генераторе. С этой точки зрения выключение цепи возбуждения возбудителя или введение добавочного сопротивления в цепь возбуждения возбудителя также не удовлетворительно.



Фиг. 3.

Рюденберг (см. *Elektrotechnik & Maschinenbau*, Н. 6, 1925) приводит два весьма интересных способа ускорения процесса размагничивания больших генераторов. По первому способу используется так называемый выключающий электродвигатель (или «динамическая емкость»), якорь которого включен последовательно с цепью возбуждения генератора и нормально замкнут накоротко; возбуждение выключающего электродвигателя независимо, обычно, от возбудителя турбогенератора. Для быстрого раз-

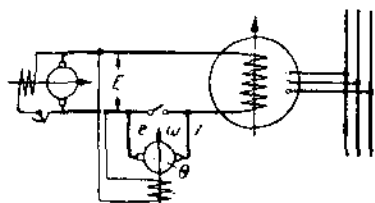
магничения генератора коротко замыкающий шунт якоря выключающего электродвигателя размыкается, и якорь двигателя приходит во вращение и развивает противоэлектродвиж. силу, вызывающую быстрое уменьшение тока возбуждения. Вследствие самоиндукции обмотки возбуждения генератора выключающий мотор ускоряется даже несколько выше установившегося числа оборотов и затем тормозится обратным током возбуждения. Осциллограммы (фиг. 5), заимствованные из



Фиг. 4.

Generator 2 Wicklungen je Phase — генератор 2 параллельн. ветви на фазу. Spartransform. 2 Wicklungen je Phase — автотрансформ. 2 параллельн. ветви на фазу.

явление. При размагничивании путем введения добавочного сопротивления в шунт возбuditеля поле уменьшается на 50%, в течение 10 сек. и не падает ниже 35% первоначального значения.



Фиг. 5.

Рюденберга, лучше всего иллюстрируют

При помощи выключающего электродвигателя поле исчезает совершенно в 3—4 секунды.

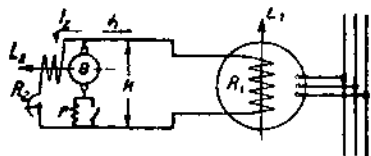
Так как вся энергия, потребляемая якорем выключающего электродвигателя, расходуется на ускорение его массы (если пренебрегать трением в подшипниках и о воздух

и сопротивлением обмотки якоря), то легко вывести, что выключающий электродвигатель по действию вполне эквивалентен некоторой емкости по величине, пропорциональной запасу живой силы вращения якоря (т.е. произведению $G \cdot D^2 \cdot n^2$) и обратно пропорциональной квадрату приложенного к якорю напряжения V . Обозначая эту емкость через C , получаем, согласно вывода Рюденберга,

$$C = \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 \cdot \frac{n^2 \cdot G D^2}{p^2}.$$

Эта динамическая емкость для электродвигателя на 3 кВт. при 1500 об./мин. получается порядка 2,5 фарад, т.е. весьма значительной.

Другой способ быстрого размагничивания генератора, предложенный Рюденом, основан на включении последовательно с якорем возбудителя некоторого сопротивления r , обычно замкнутого накоротко. Для быстрого размагничивания генератора достаточно разомкнуть шунт, замыкающий сопротивление накоротко и в цепи возбуждения получается быстрое исчезновение тока возбуждения, если сопротивление r подобрано таким образом, что возбудитель мгновенно перемагничивается (фиг. 6).



Фиг. 6.

Подбор сопротивления r основан на решении дифференциального уравнения для тока z в цепи возбуждения генератора, имеющего по Рюденому вид

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \left(\frac{R_1 + r}{L_1} + \frac{R_2 + r}{L_2} - \frac{N}{L_2} \right) \frac{dz}{dt} + \left(\frac{R_2}{L_2} \cdot \frac{R_1 + r}{L_1} - \frac{R_1}{L_1} \cdot \frac{N - r}{L_2} \right) z = 0.$$

Здесь:

R_1 и L_1 — соответственно сопротивление и коэффициент самоиндукции цепи возбуждения генератора,

R_2 и L_2 — соответственно сопротивление и коэффиц. самоиндукции цепи возбуждения возбудителя,

r — сопротивление в цепи якоря возбудителя,

N — множитель пропорциональности между напряжением возбудителя и током в цепи возбуждения возбудителя (возбудитель предполагается слабо насыщенным).

При соответственном подборе сопротивления (по данным Рюденом хороший результат получается при $r \approx R_1$) поле в генераторе через 3—4 сек. практически доходит до нуля. Еще интенсивнее затухание тока короткого замыкания при применении последнего из указанных способов размагничивания генераторов. Ток короткого замыкания затухает в 1—2 сек.

Несмотря на применение мер предупредительной защиты генераторов в виде релэ и мер по быстрому размагничиванию генераторов при повреждениях для крупных машин следует предусматривать тушение пожара обмотки особыми мерами. При охлаждении генераторов струей свежего воздуха опасность пожара обмотки особенно велика. Прекращение доступа свежего воздуха

в момент начала горения путем плотного прикрытия заслонов в вентиляционных трубах и использование для тушения достаточно емкой батареи цилиндров с углекислотой дает довольно большую уверенность в тушении пожара. Всеобщ. Комп. Электр. (AEG—Berlin) рекомендует для генераторов с охлаждением струей свежего воздуха применять тушение генератора впуском в него пара.

На некоторых станциях в Германии такое тушение пожара в генераторе предусмотрено, но эксплуатирующие установку признают, что „к счастью“ этим способом пока не пришлось пользоваться.

При охлаждении генератора круговоротом воздуха, охлаждаемого водой, развитие пожара менее вероятно, и достаточно впуска углекислоты из одного или нескольких цилиндров в круговорот воздуха для прекращения пожара. Применение водяных охладителей и круговорота охлаждающего воздуха помимо улучшения условий для тушения пожара в генераторе оказывает громадное влияние на исправную работу роторов турбогенераторов, так как предохраняет их от загрязнения.

Что касается защиты генераторных обмоток от перенапряжений, то в тех случаях, когда произведено испытание обмотки генератора волной крутого фронта (Sprüngenwellenprobe), особая защита требуется лишь при наличии опасных динамических атмосферных перенапряжений, а также перенапряжений, вызываемых перемежающимися заземляющими дугами в системах с большой емкостью; наконец, пробивание изоляции в повысительных трансформаторах, вызывающих период высокого напряжения на генераторную систему, в некоторых случаях потребует применения защитных мер.

Для защиты от динамических атмосферных перенапряжений, опасных лишь в случаях питания от генераторного напряжения воздушных линий значительного протяжения в районах, подверженных сильным грозам, могут применяться разрядники и дроссельные катушки.

Для надежного защитного действия дроссельной катушки существенно, чтобы в соответствии с новейшими исследованиями емкость между начальными витками катушки была по возможности мала.

При питании воздушных линий незначительной по сравнению с генераторами мощности в целях металлического отделения воз-

душных линий от генераторной системы могут применяться трансформаторы с коэффициентом трансформации 1:1.

Для защиты от перенапряжений, вызываемых перемежающимися заземляющими дугами, а также перенапряжений при пробивании трансформаторов наиболее действительной мерой является заземление нейтралей генератора через малое сопротивление, рассчитанное на необходимое ограничение однофазных токов короткого замыкания. Эта система заземления пользуется большим распространением в американск. практике. Европейская практика, избегая однофазных коротких замыканий при заземлении, выдвинула для борьбы с заземляющими дугами гасительные катушки Петерсена или гасительные трансформаторы Бауха.

Для защиты от повреждения изоляции генераторов при пробивании изоляции в повысительном трансформаторе Всеобщ. Комп. Электр. разработала специальный тип шарового защитного разрядника, при помощи которого осуществляется глухое заземление той фазы генераторной системы, на которую произошло пробивание в трансформаторе (см. опис. E. T. Z., 1925 г. N. 30 Mitteilug der AEG).

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ТУРБИНЫ ВЫСОКОЙ БЫСТРОХОДНОСТИ В АМЕРИКАНСКОЙ ПРАКТИКЕ.

Инж. А. В. Лавров.

Переживаемый нами период характеризуется интенсивным темпом утилизации водных источников. За сравнительно небольшой срок (10—15 лет), гидравлические установки, игравшие ничтожную роль в мировом энергическом балансе, достигли небывалого развития и стали являться одним из главных факторов электроснабжения.

Стремление к рациональному и экономичному использованию белого угля породило усиленное искание новых идей, новых усовершенствований, дающих возможность понизить стоимость вырабатываемой энергии. Последняя в гидроэлектрических станциях обусловлена главным образом первоначальными затратами, распределение которых в отдельных, составляющих установку элементах (плотина, канал, здание станции и др.), завися от целого ряда факторов, различно. При использовании низких напоров главное значение имеет здание станции и размещенное в нем гидравлическое и электрическое оборудование.

Увеличивая быстроходность турбины, мы достигаем уменьшения ее диаметра, диаметра генератора, а следовательно и размеров станции. Отсюда вполне ясно, что прогресс в области низконапорных установок и направлен главным образом в сторону увеличения быстроходности гидравлических двигателей.

Последняя характеризуется известным соотношением, носящим название коэффициента быстроходности и выражающегося формулой:

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{N}}{H \cdot \sqrt{H}},$$

где n_s — коэф. быстроходн., n — число оборотов, H — напор, N — мощность.

Влияние коэффициента n_s на размеры турбины чрезвычайно эффектно иллюстрируется фиг. 1, где приведены 3 равных по мощности рабочих колеса турбины, работающих на одном напоре. Два первых типа, *A* и *B*, принадлежат: тихоходной ($n_s=95$) и быстроходной ($n_s=360$) турбине Френсиса. Последнее *C* является рабочим колесом диагональной пропеллерной турбины с $n_s=700$.



$N_s = 95$



$N_s = 360$



$N_s = 700$

Фиг. 1.

В довоенное, а отчасти даже и в военное время единственным типом быстроходного двигателя являлась турбина Френсиса. Обладая чрезвычайно ценными качествами: значительным к. п. д. и сравнительно высоким коэффициентом быстроходности n_s , турбина Френсиса долгое время удовлетворяла непрерывно повышающимся требованиям и заставляла думать, что развитие гидравлических двигателей пойдет по пути совершенствования исключительно этого типа. Но оказалось не так. Быстрый рост мощности гидравлич. установок ставил на очередь вопрос о применении турбин в несколько десятков тысяч сил в каждой. С другой стороны, потребность в энергии заставила обратить внимание на утилизацию крайне низких напоров порядка 3—4 м и даже ниже. Эти условия влекли за собой непрерывное повышение быстроходности турбин Френсиса, за сравнительно короткий срок достигшей значения 400—450. Турбины нашей Волховской установки $N=10\,000$ HP, $H=10,5$, $n=75$ об./мин. являются одним из самых быстроходных представителей именно этого типа ($n_s=400$).

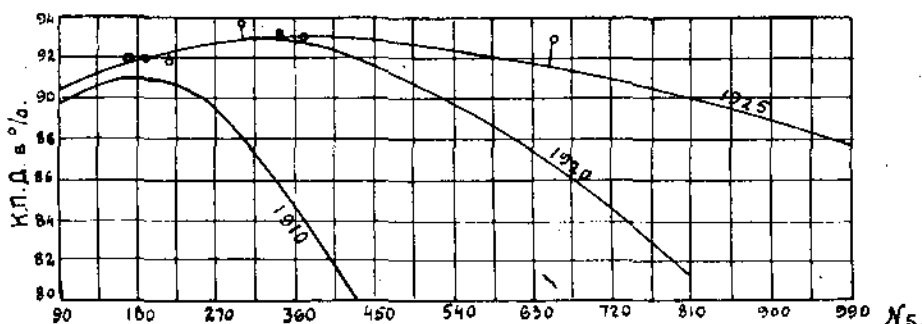
Дальнейшему увеличению вышеприведенных значений препятствовало одно обстоятельство, общее всем турбинам, а именно: падение к. п. д. турбины при увеличении ее быстроходности (см. фиг. 2). Но остановиться на достигнутом пределе было нельзя. Несмотря на принадлежность к так называемому сверх-быстроходному типу турбины Френсиса, Волховские турбины развивают лишь 75 об./мин., что является причиной чрезвычайно высокой

величины их диаметра (5030 *mm*) и диаметра генератора (9,900 *mm*).

Уменьшение этих значений при данном n , возможно лишь за счет уменьшения мощности агрегата. Здесь в качестве примера можно привести установку „Forshuvudforsen“, оборудованную турбинами Френсиса в 7700 *HP* 83,3 об./мин. ($n_s = 400$) для работы на напоре 10,3 *m*.

Исходя из соотношения $N = \frac{n_s H^{1.25}}{n^2}$, видим, что увеличение числа оборотов двигателя до 83,3 было достигнуто лишь за счет соответствующего снижения мощности.

Таким образом предел в коэффиц. быстроходности обуславливает предел мощности одного агрегата. Чрезвычайная затруд-



Фиг. 2.

нительность удовлетворительного разрешения вопроса о создании турбины Френсиса, с n , большим 400—450, заставила взяться за разработку и постановку опытов с другими типами.

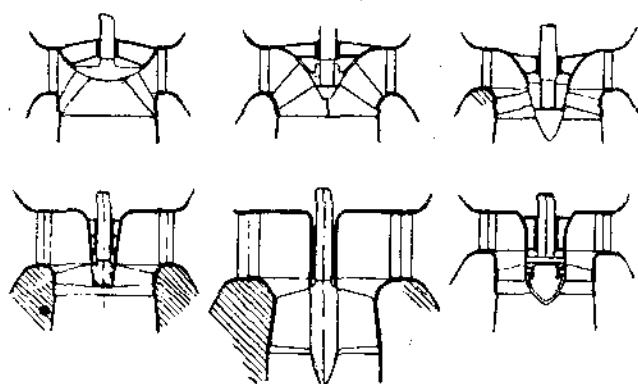
Целый ряд выдающихся экспериментаторов: Каплан, Ловачек и др. в Европе, Moody, Nagler, Taylor в Америке, начали опыты с пропеллерными, крыльчатыми и винтовыми (Bell'я) турбинами (фиг. 3). Краткая история развития этих типов представляется в следующем виде. В период 1908—1911 гг. Каплан, Mieses и Hamel работали над изучением проблемы многомерного (multidimensional) движения жидкости.

Позднее, при постановке опытов Каплан пригласил Storek'a и совместно с ним сконструировал свою первую пропеллерную турбину, имевшую всего 10 *cm* в диаметре и снабженную стеклянной всасывающей трубой. Результатом этих, а также последующих опытов было появление получившей теперь всеобщую известность турбины Каплана.

Ловачек, турбины которого отчасти напоминают конические Френсисовские колеса, начал свои опыты значительно позже и при этом не с турбинами, а с центробежными насосами.

Первый насос его конструкции был выпущен в 1914 г., а первая турбина в 1921 г. в Шарлоттенбурге и имела к. п. д. 87% при $n_s = 500$.

Одновременно с опытами Каплана начал свои испытания подобной же турбины Наглер. Их первые модели, обладая быстроходностью, значительно превышающей таковую в турбинах Френсиса, и сравнительно высоким значением макс. к. п. д., имели резко падающую форму рабочей характеристики.



Фиг. 3.

Этот недостаток, сказывающийся тем сильнее, чем выше n_s , был особенно ярко выражен в первых, еще не разработанных, конструкциях пропеллерных и других двигателей.

Причиной его являлись потери на „удар“ воды о лопатки рабочего колеса, имеющие место при отклонении режима работы от нормального.

Вполне понятно, что эти потери выражались наиболее ярко в быстроходных турбинах. Профессор Каплан, с целью осуществить постоянство безударного входа воды, сделал поворотными не только лопатки направляющего аппарата, но и лопатки рабочего колеса. С такой характерной особенностью, отличающей ее от всех других типов, и вошла турбина Каплана в практику гидроэлектрических установок. К главному отличию первой турбины Каплана от Френсиса: „наличию незанятого лопатками большого промежуточного пространства и малому числу их“, отличию, впло-

следствии ставшему общим для всех типов пропеллерных турбин, прибавилось еще одно: „поворот лопаток рабочего колеса с целью достижения пологой характеристики“.

Эта особенность и является главным различием турбин Каплана и Наглера, имеющих одинаковый аксиальный ввод воды на лопатки рабочего колеса. Несколько позже Наглера выступил на сцену со своим типом гидравлического двигателя известный американский экспериментатор Moody, достигший в этой области выдающихся результатов. С его именем связаны все рекордные по мощности, быстроходные гидравлические турбины, с ним неразрывно связаны все последние достижения американской практики гидроэлектрических установок. Турбины Moody в отличие от таких Каплана и Наглера имеют перекрывающие друг друга лопатки рабочего колеса, расположенные диагонально.

Таковы главнейшие представители быстроходных двигателей последнего времени.

При всех в высшей степени существенных отличиях в деталях, они имели много общего, что отделяло их от старой Френсисовской школы турбиностроения.

Это общее заключалось в следующем:

- 1) отсутствие обода рабочего колеса;
- 2) введение большого промежуточного пространства между лопатками направляющего аппарата и рабочего колеса, что позволяет струе переменить радиальное направление на аксиальное до входа на рабочее колесо;
- 3) уменьшение поверхности рабочих лопаток и сокращение числа их;
- 4) применение новых более усовершенствованных типов всасывающих труб.

Все эти нововведения позволили значительно повысить n_s , не допуская сильного падения к. п. д. при частичных открытиях.

Блестящий успех, достигнутый за сравнительно небольшой срок работы пропеллерных турбин, встреченных чрезвычайно недоверчиво при своем появлении, вызвал усиленный, продолжающийся еще и сейчас спор европейских и американских инженеров о приоритете этого изобретения. Для нас, конечно, спор их имеет лишь исторический интерес — с чисто практической реальной точки зрения важно не то, кто изобрел, а то, где достигнуты наилучшие результаты.

Приводимая нами таблица 1-я дает картину мирового прогресса в области турбиностроения.

Наименование установки.	Напор в м.	Мощность на валу генератора.	Число оборотов.	Расход в м ³ /сек.	Типы турбин.
Chancy-Paugny Швейцария	8,5	7600	83,3	93	Френсиса
Mississippi С.-А. С. Ш.	10	10 000	57,7	93	Френсиса
Parahiba Бразилия	32	32 500	—	89	Френсиса
Niagara С.-А. С. Ш.	65	70 000	107	93	Френсиса
Ysle Maligne Канада	33,5	45 000	112,5	116	Френсиса
Manitoba Канада	17	28 000	138,5	144	Пропеллерн.
Lilla Edet Швеция	6,5	10 000	62,5	139	Пропеллерн.
La Gabelle Канада	18	30 000	120	194	Пропеллерн.

Таблица показывает, что турбины установок „Manitoba“ и „La Gabelle“ являются рекордными, в смысле достижения максимальной мощности и высоты рабочего напора пропеллерных турбин. Они принадлежат к типу „Moody“, в связи с чем и остановимся на нем подробнее.

Анализ движения потока в турбине Moody.

Турбина этого типа, на первый взгляд, имеет большое сходство с корабельным винтом. Но это сходство только внешнее. То и другое различаются режимом своей работы. В то время, как в судоходном винте вода приближается к нему в направлении

параллельном оси вращения, в турбинах благодаря наличию направляющего аппарата она входит в нее с радиальной составляющей скорости.

Радиальный компонент меняет свое направление на диагональное, сохраняющееся вплоть до выхода воды из рабочего колеса.

Вода, проходящая сквозь турбину (понимая под последней сумму всех ее элементов: камеры, колеса и всасывающие трубы), содержит три типа вращения, имеющих место одновременно и каждый около собственной оси. Первое из них (primary whirl) происходит в спиральной камере и достигает особой интенсивности после прохождения водой стационарного кольца и движения ее по направлению к оси.

Частично рассеиваемый в рабочем колесе, первичный вихрь в сокращенной степени все же дает себя знать во всасывающей трубе. Анализ действия этого вихря показывает, что тангенциальные составляющие скорости вращательного движения обратно пропорциональны радиальному расстоянию от оси турбины.

Поэтому для получения в камере наименьших потерь необходимо, чтобы сечения ее при переходе от одного к другому изменялись не только пропорционально соответствующему изменению расхода, но построение их должно учитывать факт увеличения скорости при уменьшении радиального расстояния. (Закон площадей.)

В спроектированной таким образом камере нет оснований ожидать потерь больших, чем потери на трение в соответствующей длины прямых трубах.

После прохождения водой регулирующего аппарата она движется по направлению к оси с постепенно усиливающейся обратно пропорционально радиусу скоростью; вследствие этого давление, преобразуясь в кинетическую энергию, падает и у самой оси оно очень часто ниже атмосферного.

Эффект описанного явления настолько значителен, что на входных кромках рабочих лопаток давление лишь немногим выше, чем во всасывающей трубе. Такое положение чревато опасными последствиями. Оно может создать кавитацию, т. е. формацию пустот, с неизбежным образованием водоворотов, вихрей и воздушных мешков, вызывающих разъедание лопаток и их вибрацию. Чтобы устранить эту опасность, необходимо впускать воду на рабочие лопатки раньше, чем она достигнет оси и, следовательно, макси-

мального значения скорости. Образование вакуума у входной кромки лопаток рабочего колеса становится особенно заметным в случае работы турбины при частичном открытии направляющего аппарата. С целью сохранить лопатки от разъедания, последним в рассматриваемой турбине придана диагональная форма расположения, дающая возможность, при одном и том же диаметре, значительно увеличить размеры ступицы (Hub) и тем, не допуская струи до оси турбины, положить предел увеличению ее скорости.

Другим обстоятельством, говорящим в пользу принятия именно диагональной формы колеса, явилось следующее. Как мы уже указывали, скорость движения воды по выходе из направляющего аппарата обратно пропорциональна радиусу. В то же время скорость вращения данной точки лопатки прямо пропорциональна ему.

В результате несоответствия изменения скорости вращения воды и лопаток, первая будет двигаться со скоростью большей, чем колесо, создавая сложную траекторию пути со значительными потерями энергии. Диагональное расположение лопаток устраняет этот недостаток и повышает к. п. д. колеса.

Второй вид вихревого движения в турбине имеет место в меридиональной плоскости, вокруг оси к ней перпендикулярной.

Он увеличивает давление вверху и внутри промежуточного пространства турбины, увеличивает скорость и сокращает давление у выходных кромок рабочих лопаток.

Вращательное движение содействует неравномерному распределению скоростей в направляющем аппарате, уменьшая их вверху и увеличивая внизу.

Принимая во внимание малую величину пути, проходимого потоком воды, двигающимся от нижней части направляющего аппарата к оси, последний фактор не имеет особого значения.

Принятая Moody форма всасывающей трубы, имеющей чрезвычайно большой угол конусности, вызывает уменьшение скорости меридионального вихря и регенерацию его в потенциальную энергию с сравнительно малыми потерями.

Третьим типом вращательного движения являются местные вихри вокруг лопаток рабочего колеса.

Оси вращения их пересекают направление потока жидкости и лежат, приблизительно, во вращающейся меридиональной плоскости. Вихри вызывают падение давления на нижней поверхности лопаток, образуя кавитацию со всеми ее последствиями. Полу-

чающаяся на верхней и нижней стороне лопаток разность давлений особенно сильна в турбинах с малой площадью рабочих лопаток.

Поэтому малое число узких лопаток усложняет борьбу с кавитацией. Сравнение опытных кривых четырехлопастной аксиальной и шестилопастной диагональной турбины показывает, что при прочих равных условиях работы характеристика последней имеет значительно более пологую форму.

Таков анализ движения потока в диагональной турбине, вполне объясняющий причины выдающихся результатов, достигнутых этим конструктором. Они являются следствием совмещения в одной турбине диагонального расположения и большей площади лопаток (с проистекающими из этого преимуществами) с крайне удачной формой всасывающей трубы („Moody Spreading“). На последней мы остановимся ниже, сейчас же укажем, что, имея угол конусности значительно больший, чем обычного типа трубы, она обладает и меньшим с ними протяжением в аксиальном направлении, а это создает возможность более продуктивной регенерации вторичного вихря. Конус заполняет место формации водоворотов и вихрей в центральной части трубы. Все это соединенное со спиральной формой трубы в ее горизонтальном выходном направлении обуславливает регенерацию вращательной составляющей, что повышает к. п. д. при всех открытиях направляющего аппарата.

Установки с турбинами Moody.

Диагональные турбины строятся на мощность от 350 до 30000 *HP*. Первой установкой, обратившей на них всеобщее внимание, была „Great Falls of the Manitoba Power Co“¹ в Канаде. Она оборудована двумя турбинами этого типа по 28000 *HP* 138,5 об./мин., $n_s = 682$, $H = 17$ м.

Турбины установки „Manitoba“, работая на много уменьшенном против нормального напоре, все же имеют очень высокую продуктивность. В данном случае при колебании напора от 5,5 до 15 м они развивают мощность от 7500 до 25000 *HP*. Эти цифры вместе с соответствующими для полной мощности турбины подтверждают основной закон, впервые установленный проф. Бахметевым для турбин Френсиса, а именно: „Прямолинейное

¹ Power. 18 марта 1924 г.

изменение мощности турбины при переменном напоре и постоянном числе оборотов".¹

Турбины оборудованы всасывающими трубами „Moody Spreading“. Их нижний конец поддерживается 8 чугунными колоннами, расположенными по направлению течения воды и рассчитанными на полное давление веса турбин, генератора, бетона и воды в камере. Для предупреждения образования вихрей в центре трубы находится бетонный конус, заканчивающийся вверху чугунной шапкой, которая является опорой для рабочего колеса во время сборки и разборки турбины.

В настоящее время можно подвести итоги более чем двухлетней эксплуатации этих двигателей.

С положительной стороны она характеризуется спокойным темпом работы, устойчивостью и отсутствием ударов, вибраций и пр.

Что же касается отрицательных, то здесь необходимо констатировать факт медленного разъедания выходных кромок рабочих лопаток, но эффект этот слаб и незначителен.

В находящихся более года в работе установки „La Gabelle“ этого же типа, но большей мощности — 30000 HP, разъедания лопаток, несмотря на более высокий напор 18,4 м, совершенно не замечается.

Но на той и другой станции разъеден бетон на верхушке конуса всасывающей трубы. Последнее было исправлено покрытием поврежденной поверхности стальными листами.

Из других менее крупных установок с турбинами Moody следует отметить следующую: станции „Feeder Dam“ на реке Hudson, пять единиц по 1500 HP, 120 об./мин., $n_s = 677$. Рабочий напор от 4,75 до 6,1 м. В основу ее проектирования был положен принцип минимума первоначальных затрат, поскольку это не ухудшало гидравлических и механических условий работы. Установка находилась в эксплуатации несколько месяцев и за это время показала превосходные качества работы своих турбин.

Более значительный срок работы, 14 месяцев, имеет установка в Anson'e турбины по 1500 HP, 150 об./мин., $n_s = 640$. Фиг. 4 дает кривую испытаний одной из этих турбин, полученную при действ. рабочих условиях. Максимум к. п. д. достигает 90,9%, что является рекордным для турбин данной быстроходности.

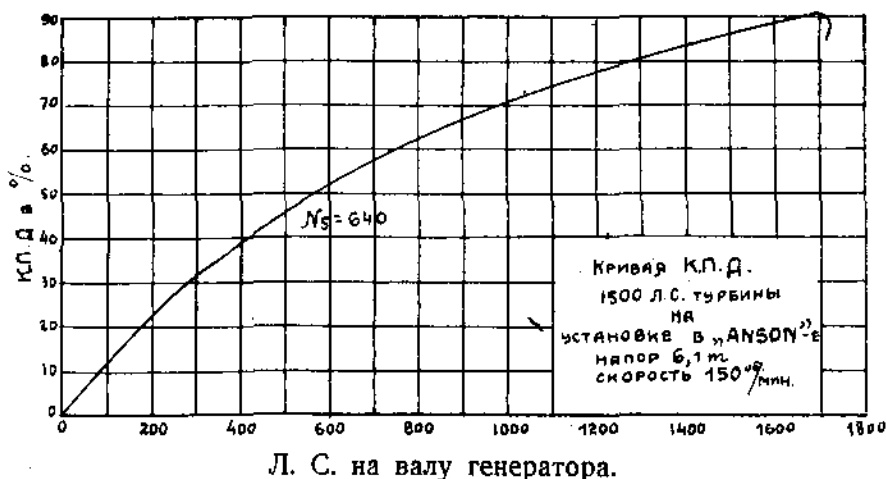
¹ Б. Бахметев — К работе турбин при неравномерном режиме. Изв. СПб. Политехн. Инст. 1908 г., т. IX.

Испытания производил проф. С. М. Allen, используя „salt velocity“ — метод измерения расхода.

Установкой подобной вышеприведенной является „Karuska-sing“ (Ontario), оборудованная одной турбиной на 2500 HP, 180 об./мин., напор 9,2 м. Предварительный отчет ее испытаний показывает к. п. д. выше 90%.

Из очень мелких станций можно указать на установку Howard Smith Paper Co; две турбины по 350 HP, 99 об./мин., $n_s = 597,5$.

Привлекает к себе особый интерес установка Illinois Northern Utilites Co. Она использует чрезвычайно низкий напор: около 2,5 м. Вполне понятно, что столь малая величина очень затрудняет полу-



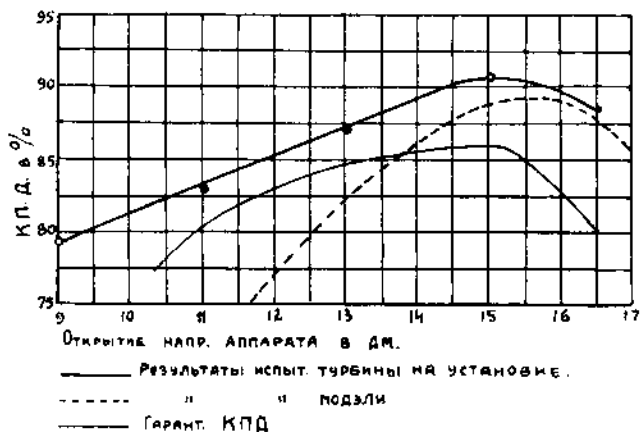
Фиг. 4.

чение значительных мощностей в одной единице. В данном случае проблема была удачно разрешена применением пропеллерных турбин Moody 800 HP, 80 об./мин., $n_s = 750$. Указанное значение мощности в одной единице является рекордным для такого низкого напора. Фирма гарантирует очень высокие величины мощности и к. п. д. при изменении напора от нормального; так при напоре 1,2 м турбины должны развивать 280 HP при максимуме к. п. д. 68,5%, и при напоре 2,75 м 925 HP, имея максимум к. п. д. 90%. Опыты с моделями дают основание предполагать, что приведенные значения полезной отдачи энергии в действительной работе будут выше процента на два. Установка состоит из пяти агрегатов.

Турбины Наглера.

Следующим типом гидравлического быстроходного двигателя, получившим, правда, менее обширное применение, является уже упомянутая нами турбина Наглера. Имея четыре лопатки рабочего колеса и аксиальный ввод воды на них, она представляет почти точную копию первых моделей Каплана, имевших неподвижные рабочие лопатки.

Мощность турбин Наглера колеблется от 100 до 5000 *HP*. Последняя цифра является максимальной и до настоящего времени непревзойденной. Турбины работают на самых различных напорах от 0,55 *m* (22") до 11 *m*.



Коэффициент быстроходности колеблется в пределах от 400 до 1100. В отношении полезной отдачи энергии здесь за последнее время достигнуты замечательные результаты.

Максимум к. п. д., как видно из фиг. 5, достигает 91%. Он получен на турбине в 2500 *HP*, 138,5 об./мин. Что касается к. п. д. при частичной нагрузке, то он для турбины с $n_s = 780$ равен 66%. Наглер так же, как и Moody, сделал лопатки своего колеса неподвижными, стараясь чисто гидравлическим путем разрешить проблему создания пологой характеристики.

Влияние величины диаметра на к. п. д. турбины.

Прогресс в области гидравлических двигателей идет по пути главным образом экспериментальных (лабораторных) исследований.

Выработка стандартных типов и серий гидравлических двигателей, наконец, чрезвычайно ответственная работа по конструированию мощных турбин, требует предварительных испытаний моделей, имеющих сравнительно малый диаметр рабочего колеса. В виду необходимости еще до постройки самых турбин иметь суждение об их полезной отдаче, приобретает особое значение правильное установление зависимости к. п. д. от размеров турбины. Для этого до сих пор главным образом применялась известная формула Camerer'a:¹

$$e' = 1 - (1 - e) \frac{0,12 + \frac{0,015}{\sqrt{\left(\frac{F_2}{U_2 D}\right) \cdot D'}}}{0,12 + \frac{0,015}{\sqrt{\left(\frac{F_2}{U_2 D}\right) \cdot D}}},$$

где e и e' и D и D' — к. п. д. и диаметр турбин соответственно; F_2 — площади выходного сечения; U_2 — периметр.

Выражение $\frac{F_2}{U_2 D}$ дает отношение гидравлического радиуса в том сечении к диаметру колеса.

Эта формула обладает целым рядом весьма важных недостатков, а именно:

1) В нее входит гидравлический радиус прохода воды через турбину, который в виду изменяемости сечения этого прохода является величиной непостоянной. Для правильного определения этого радиуса необходимо исходить из некоторого среднего значения его, что еще более усложнит и без того сложную формулу. Camerer выходит из этого затруднения, относя гидравлический радиус к минимальному сечению, соответствующему выходу воды из рабочего колеса.

2) Camerer, основывая свою формулу на универсальной формуле Билля, исходит из предположения, что потери в турбине зависят только от трения воды о лопатки, что противоречит общепризнанному в настоящее время факту отнесения части потерь на водовороты и вихри.

Исходя из последнего, Moody предложил свою более простую и дающую чрезвычайно хорошие результаты формулу, вывод которой основан на экспоненциальных формулах Forcheimer'a

$$v = kR^{0.7}J^{0.5}$$

¹ Camerer. — Vorlesungen über Wasserkraftmaschinen, 1924.

(где R — гидравлич. радиус; v — скорость и J — уклон) и Strickler'a

$$J = \frac{v^2}{k^2 R^{1/3}}$$

Ход его рассуждений при выводе этой формулы был таков.

Если обозначить к. п. д. турбины через e , то потери выразятся как некоторый коэффициент $\lambda = 1 - e$. Потери в подобных же колесах большого диаметра можно выразить произведением $a(1 - e)$, где a — меньше единицы. В виду того, что часть потерь остается постоянной при увеличении диаметра колеса (потери на водовороты и вихри), остающаяся часть равная $(1 - a)(1 - e)$ составляет разность в потерях на трение.

Исходя из этого, потери в колесе меньшего диаметра возможно выразить так:

$$\lambda' = 1 - e' = a \cdot (1 - e) + \lambda'_f$$

Потери на трение λ'_f считаем по экспоненциальной формуле $h_f = F \frac{L}{R^x} V^m$, в которой показатель m , за исключением очень гладких поверхностей труб малого диаметра, равен 2. Значение показателя x может колебаться между 1,4 (Forcheimer), 1,67 (Hazen-Williams) и 1 1/3 (Strickler).

Выражая x через $1 + p$, где p по Strickler'у равно 1/3, получим формулу для потери напора в следующем виде:

$$h_f = F \frac{L}{R} \cdot \frac{V^2}{R^p}$$

или в функции от полного напора турбины

$$\lambda'_f = \frac{h_f}{H} = F \frac{L}{R} \cdot \frac{V^2}{R^p \cdot H}$$

В подобных турбинах при соответствующих открытиях направляющего аппарата v^2 изменяется пропорционально напору, так что отношение $\frac{V^2}{H} = const$. Отношение $\frac{L}{R}$ в подобных турбинах есть величина постоянная, а R пропорционально диаметру колеса. Отсюда:

$$\lambda_f = \frac{k}{D^p} = (1 - a)(1 - e) \leq k = (1 - a)(1 - e) D^p; \lambda'_f = \frac{k}{D^p}$$

$$\lambda'_f = (1 - e') = a(1 - e) + (1 - a)(1 - e) \frac{D^p}{D^p}$$

$$\frac{1 - e'}{1 - e} = a + (1 - a) \left(\frac{D}{D'}\right)^p \dots \dots \dots (1)$$

При использовании этой формулы для целого ряда опытов выяснилось, что вышеприведенное выражение (1) можно упростить заменой $a + (1 - a) \left(\frac{D}{D'}\right)^p$ отношением $\left(\frac{D}{D'}\right)^a$.

Коэффициент n для всех наблюдаемых случаев мало отличался от значения $1/4$.

В окончательном виде формула выражается так:

$$e = 1 - (1 - e') \left(\frac{D}{D'}\right)^{1/4}.$$

Одновременно с Moody такое же выражение для вышеприведенной зависимости было найдено проф. Политехнического Института А. А. Морозовым, который вывел его чисто аналитически, не прибегая к экспериментальным исследованиям.

Немного позже подобное же выражение для пересчета характеристик было предложено Stauffer'ом.¹ Последний усложнил его введением механического к. п. д. и отношения напоров.

В видоизменении Stauffer'a формула имеет следующий вид:

$$e' = \left[1 - \left(1 - \frac{e_m}{e_m'} \right) \left(\frac{D}{D'}\right)^{1/4} \left(\frac{H}{H'}\right)^{1/16} \right] e_m',$$

где e' , D' , H' и e_m' — к. п. д. диаметр, напор и механический к. п. д. главной турбины; e , D , H , e_m — соответствующие значения для модели.

Эта формула успела вызвать оценку² со стороны Moody, который считает, что значение показателя $1/16$ в отношении напоров преувеличено, а введение мех. к. п. д. кроме усложнения формулы ничего не дает.

Всасывающие трубы и проблема кавитации.

С увеличением мощности гидравлических двигателей увеличивается неустойчивость режима работы всасывающих труб. Появление пустот и пульсаций струй вызывает вибрацию и даже резонанс частей машинного здания.

Это то, что относится ко всем турбинам, в том числе и к высоконапорным.³ Что касается турбин быстроходных, то здесь, в виду сильного развития вращательной составляющей скорости, задача всасывающей трубы необычайно усложняется.

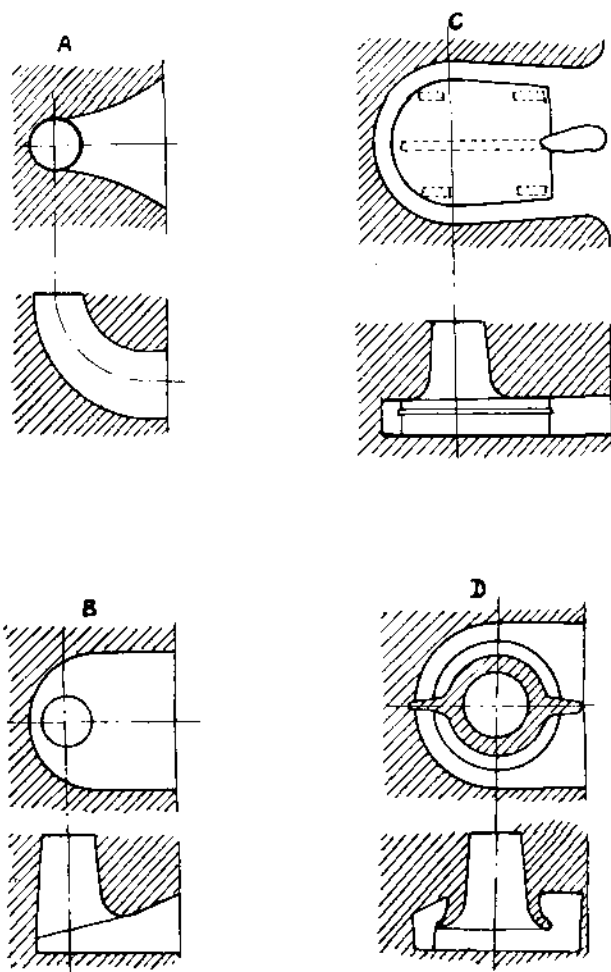
¹ V. D. I. № 13. 1925.

² Proceedings American Civil Engineer. Январь 1926 г.

³ Заслуживает внимания факт оборудования турбин Френсиса уст. «Oak Grove» $H = 275$ гидроконами Moody.

Под давлением этих обстоятельств началось быстрое усовершенствование всасывающих труб.

Старый тип их elbow (фиг. 6 А) совершенно не удовлетворял новым условиям работы, так как водоворотами и обратными тече-

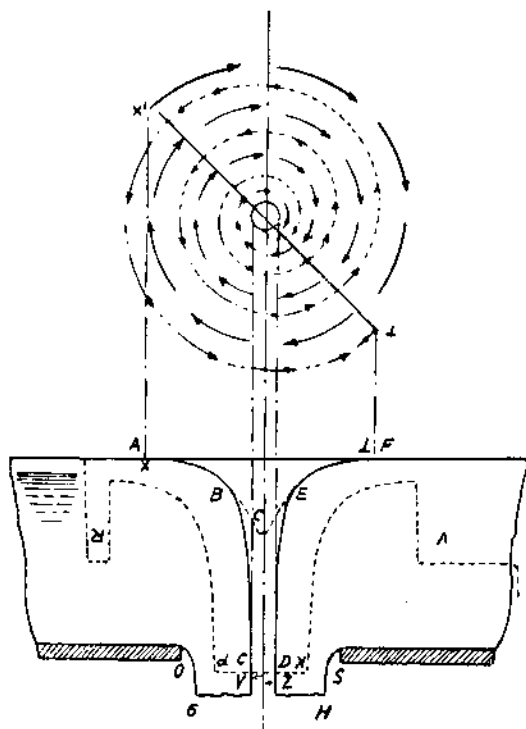


Фиг. 6.

ниями изменялась эффективная площадь ее сечения. Явившийся ему на смену более рациональный тип турбины *mushroom* (фиг. 6 В) обладал в значительной степени недостатками труб предыдущего типа; но он нес в себе начала того эволюционного процесса, который нашел себе более удачное выражение в гидроконе *Whit'a*

(фиг. 6 С). Регенерирующие свойства последнего основывались на принципе восстановления энергии на лопатках колеса Пельтона. Роль последних в данном случае исполняет диафрагма, находящаяся на некоторой высоте над основанием. Она и восстанавливает скоростной напор. В горизонтальной части трубы происходит регенерация остальной кинетической энергии. Фиг. 6 С дает одну из старых модификаций гидрокона Whit'a, в которой большая

часть замедляющего действия приходится на долю вертикальной ее части. Такая форма применима лишь для турбины средней быстроходности. Новое видоизменение трубы Whit'a (фиг. 6 D) имеет спираль в горизонтальной ее части, что способствует более продуктивной регенерации тангенциального компонента.



Фиг. 7.

своих предшественников, предложил свою конструкцию трубы, внешне имеющую большое сходство с гидроконом Whit'a, но совершенно отличную от него по принципу, положенному в основу ее действия. В то время как восстановление энергии в трубе Whit'a является подобием такового в активной турбине, в основе гидрокона Moody лежит принцип свободного вращения (free vortex) струи в открытом бассейне (фиг. 7).

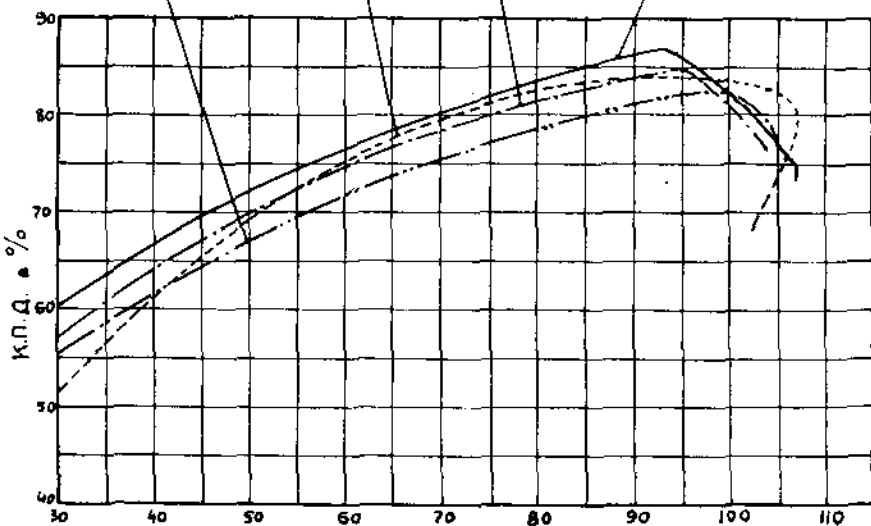
Вода вращающимся потоком выходит из отверстия OS, имея форму, ограниченную линией ABCDEFGH.

Следующей фазой развития всасывающих труб было появление уже упомянутых нами гидроконов „Moody Spreading“, имеющих в Америке преимущественное распространение. Moody, базируясь на целом ряде теоретических и экспериментальных исследований и учтя опыт

В этом случае скорость вращения вихря обратно пропорциональна радиусу, а скоростной напор — квадрату радиуса, измеряющего расстояние данной точки от оси трубы. Находящаяся на плоскости AF частица увеличивает скорость своего вращения вплоть до достижения минимального радиуса.

Обратное соотношение говорит, что чем меньше радиус, тем больше скорость вращения.

Отсюда можно вывести заключение, что, если находящаяся во вращательном движении жидкость будет увеличивать свое расстояние от центральной оси, кинетическая энергия ее может быть регенерирована в потенциальную энергию.

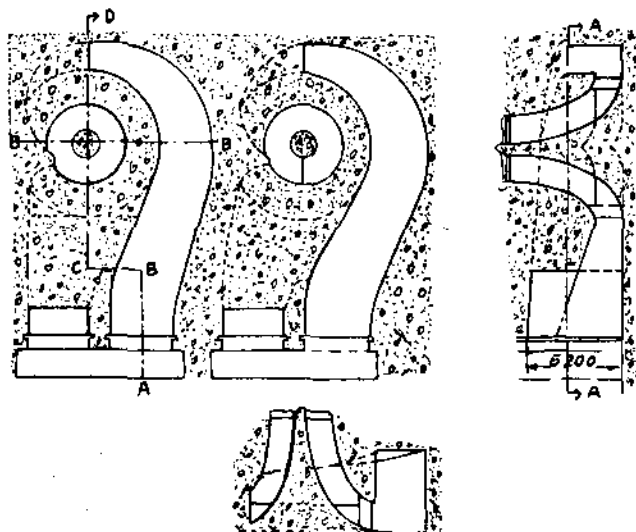


Л.С. в % от полной мощности.

Фиг. 8.

Фигура, обозначенная на рисунке пунктирными линиями, представляет собою обратный вихрь, который и является прообразом гидрокона. В данном случае это форма всасывающей трубы турбины Ниагарской установки. Бетонный конус не заполняет всего пространства, образуемого вращающейся жидкостью. На Ниагарской станции это представило неудобство в конструктивном отношении, вообще же он достигает рабочего колеса.

Построенная на принципе вращения струй труба рассмотренного типа дает чрезвычайно совершенное восстановление вращательной составляющей. Исходя из того, что все реактивные турбины при частичном открытии направляющего аппарата имеют вращательную составляющую скорости, а реактивные турбины высокой быстроходности дают ее при всех открытиях такового, последнее свойство гидрокона имеет крайне важное значение. Наглядной иллюстрацией всего нами сказанного являются испытания различных типов труб в лаборатории Morris'а, предпринятые в связи с проектированием установки Muscle Shoal, где большая мощность



Фиг. 9.

единиц требует чрезвычайно внимательного отношения к выбору всех элементов турбины. Рабочие характеристики одной и той же турбины с различными типами приведенных на той же фигуре труб, представленные на фиг. 8, указывают на несомненные преимущества гидрокона Moody перед остальными.¹

В действительной работе высокие качества последних выразились особенно ярко на примере Holtwood'ской установки,² ко-

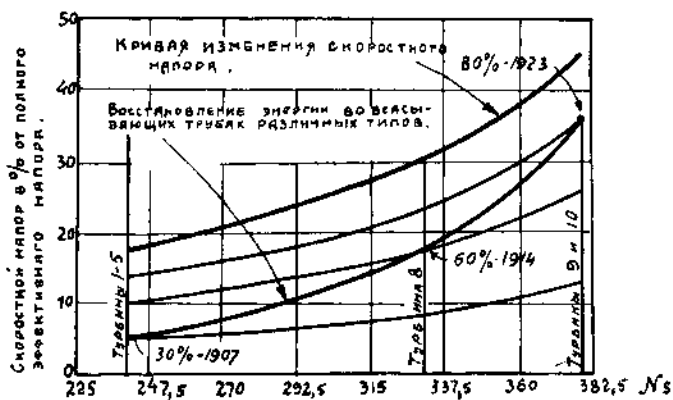
¹ За последнее время в американской практике намечается тенденция к усовершенствованию всасывающих труб типа „Alabama“. К сожалению, данных о результатах работ в этой области в литературе не имеется.

² Power. 30 сентября 1924 г.

торая последнее время была пополнена двумя турбинами Френсиса по 20000 HP для работы на напоре от 16,5 до 19,5 м. Чрезвычайно высокий скоростный напор 45% от рабочего напора 16,5 м указывает на крайне ответственную и чрезвычайно важную роль его восстановления.

Вопрос был решен применением вышеупомянутого гидрокона со спиральным коллектором в горизонтальной части (фиг. 9). Такая форма его не совсем обычна и обусловлена недостаточностью места для трубы, имеющей более расширенную горизонтальную часть.

Holtwood'ская установка представляет особый интерес в том отношении, что, пройдя через две стадии расширения, она отра-



Фиг. 10.

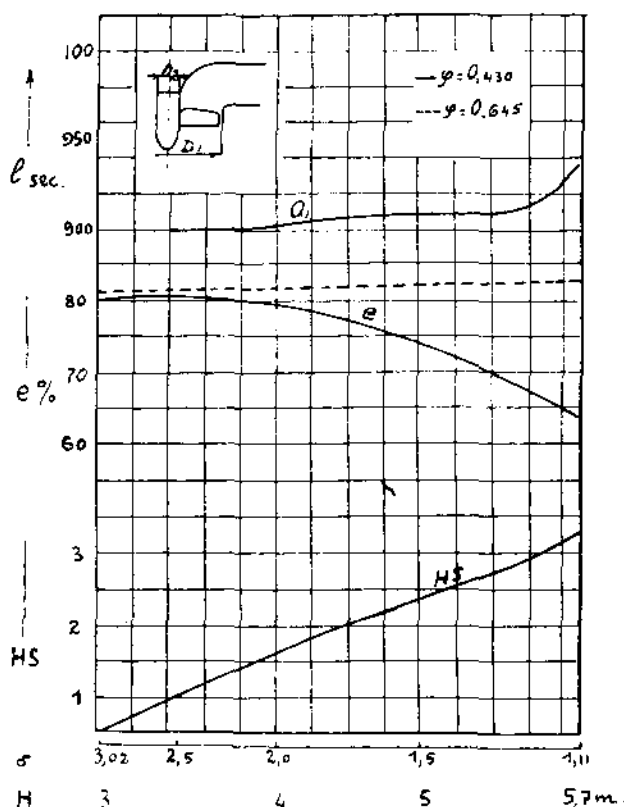
зила в себе все черты эволюционного процесса современного периода. Пять первых турбин этой станции являются двухколесными, снабженными трубами крайне несовершенной формы, с соответственно низким значением скоростного напора.

Значения всех величин, характеризующих всасывающую трубу, а именно: скоростный напор и к. п. д., представлены на фиг. 10. Крайне низкая 30% цифра к. п. д. труб 1—5 поднимается до 60% для труб 1914 (elbow) и наконец 80% в гидроконах (1923).

Из других установок с крайне высоким вакуумом всасывающих труб можно отметить гидро-электр. станцию на р. Dix,¹ оборудованную тремя турбинами по 11000 HP, 300 об./мин., $n_s = 152$. Конечно, здесь не может быть речи о значительной величине

¹ Power. 29 сентября 1925 г.

скоростного напора, но благодаря высоким амплитудам колебания горизонта нижнего бьефа, особенно значителен вакуум статический, достигающий 5 *m*. Вышеприведенные значения динамического вакуума 6 *m* (с учетом к. п. д. трубы) в Holtwood'e и статического 5 *m* установки „Dix“ являются рекордными и непревзойденными в мировой практике гидроэлектр. установок.



Фиг. 11.

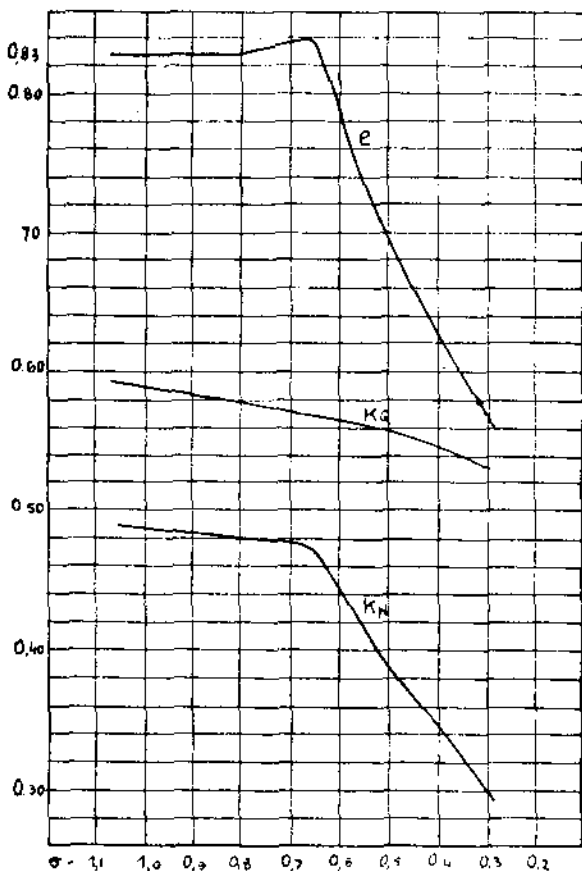
Стремление к дальнейшему прогрессу в этой области заставило усиленно заняться вопросом о мерах борьбы с кавитацией в трубах. Не говоря уже об Америке, во многих странах Европы были созданы специальные кавитационные лаборатории. Результаты опытов одной из них, „Мюнхенской“ (Германия), произведенных профессором *Thoma*¹, мы в настоящей статье и воспроизводим (Thoma Water-Power Research).

¹ The Transaction of the first World Power Conference. Vol. II.

Томпсон чисто опытным путем подтвердил аналитически выведенный Taylor'ом и Moody¹ закон подобия для кавитации.

Последний выражается так:

$$\frac{H_a - H_s}{H} = const. \dots \dots \dots (1)$$



Фиг. 12.

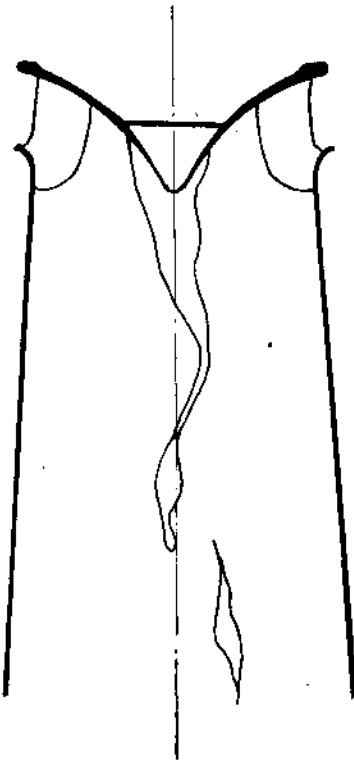
Здесь H_a — атмосферное давление минус давление пара в трубе; H_s — статическая высота всасывания; H — эффективный напор.

Разность $H_a - H_s$ выражает собой резервное, остающееся на долю динамического вакуума, давление. Кроме постоянства соот-

¹ Опубликован в 1922 г. перед Гидроэлектрич. конференцией в Филадельфии.

ношений (1) закон подобия требует постоянства отношения $\frac{D}{H}$ модели и главной турбины.

Выражение $\frac{H_0 - H_2}{H}$, обычно обозначаемое буквой σ , характеризует собой кавитацию в трубах. В функции от него и построены кривые фиг. 11 и 12, выражающие зависимость от σ величин K_N , K_Q и e , где $K_N = 0,02395N'$ (метрич.), $K_Q = 0,3193Q'$, $e = \frac{K_N}{K_Q}$.



Фиг. 13.

при большом значении выходной скорости представлен на фиг. 13.

N' и Q' выражают собой мощность и расход воды в турбине при единичном диаметре колеса и единичном напоре.

На фиг. 11 представлены результаты опытов с турбиной Каплана¹ при постоянном горизонте верхнего бьефа и переменном нижнем. Кривые показывают, что при переходе коэффициентом σ значения 2 начинается быстрое увеличение расхода воды через турбину, характеризующееся соответствующим падением отношения $\frac{K_N}{K_Q} = e$. Последнее выражено еще более ярко кривыми фиг. 12, где уменьшение σ ниже 0,75 вызывает резкое падение всех параметров e , K_N и K_Q . Дальнейшее уменьшение σ вызывает появление шума и треска, а при $\sigma = 0,37$ резких ударов в трубе. Все это является следствием кавитации отчасти на лопатках, но главным образом в центре трубы. Один из удачных снимков центральной кавитации

¹ Барометрич. давление 718 *mm*. Темп. воды 14°. $S = 0,43$; $S = 0,645$.

$$S = \frac{\text{площади проекции лопастей}}{\pi(D_1^2 - D_2^2)}$$

Пути развития быстроходных турбин в Европе и Америке.

Как мы уже указывали, главными типами быстроходных гидравлических двигателей, имеющих применение в Америке, являются турбины Moody и Наглера. Они быстро прогрессируют, повышая к. п. д. и пологость формы рабочей характеристики. Конечно, в этом отношении турбины Каплана с поворотными лопатками стоят выше американских двигателей, но необходимо иметь в виду, что введение второго регулирующего аппарата сильно удорожает турбину.

Очевидно, что с чисто экономической точки зрения, решение вопроса о дальнейшем развитии турбин Каплана заключается в том, сможет ли последняя, давая известную по сравнению с прочими экономию воды, возместить этим свою более высокую стоимость и неудобство в эксплуатации.

Здесь чрезвычайно интересно привести данные очень тщательного исследования этой проблемы инженером Engleson'ом,¹ который, основываясь на характеристиках турбины Каплана и пропеллерной (с неподвижными лопатками) равной быстроходности, $n_s = 600$ и диаметра, и турбины Френсиса ($n_s = 350$), дает следующую цифру экономии воды в турбинах Каплана в процентном отношении от поглощаемого ею количества.

Число турбин.	Пропелл. турбины.	Турбины Френсиса.
1	38%	22%
2	29%	15%
3	20%	8%
4	14%	4%
5	7%	2%

При получении этих цифр инженер Engleson исходил из характеристики пропеллерной турбины с максимумом к. п. д. в 87% в то время как последний, как мы видели, достигает 90,9% (Anson).

¹ Revue générale de L'Electricité. 14 ноября 1925 г.

Wasserkraft-Jahrbuch. 1924.

Canadian Engineer. 5 января и 12 января 1926 г.

Следовательно, приведенные значения экономии воды в турбинах Каплана по сравнению с пропеллерными являются преувеличенными, это во-первых, а во-вторых, всякая установка известный период времени сбрасывает лишнюю воду, и этого обстоятельства при окончательном учете всех факторов нельзя не принять во внимание.

Что касается разницы стоимости, то в той же статье указано, что при одинаковом с пропеллерной турбиной диаметре рабочего колеса стоимость турбины Каплана выше стоимости пропеллерной на 30% при диаметре рабочего колеса в 6 м, и на 75%, если диаметр последнего не выше 1 м.

Из других типов европейских быстроходных двигателей нельзя не указать на последние модификации пропеллерных турбин (с неповоротными лопатками) завода Escher Wiss C^o (Швейцария), имеющих к. п. д., 90,5% при $n_s = 600$.

Менее значительные, но также достойные внимания результаты, полученные проф. Пражелем, работающим над улучшением типа винтовой турбины, говорят о высоком к. п. д., достигнутом при значительном коэффициенте быстроходности.

Турбина Bell'я, впервые примененная на установке в Matte, благодаря нерациональной форме всасывающей трубы дала неудовлетворительные результаты: завод даже не выполнил своих гарантий. В связи с этим был поставлен целый ряд опытов, в результате которых была получена новая, более удачная форма трубы. Окончательные результаты испытания турбин на установке выражаются следующими цифрами:

$$\begin{array}{l} \text{максимум к. п. д. } 85,2\% \text{ при } n_s = 650 \\ \text{и к. п. д. } 80\% \quad \quad \quad \text{„ } n_s = 1000. \end{array}$$

Заслуживает внимания тот факт, что американцы, относящиеся довольно скептически к достижениям Европы, обратили особое внимание на возможности, проистекающие из дальнейшего развития турбин Bell'я.

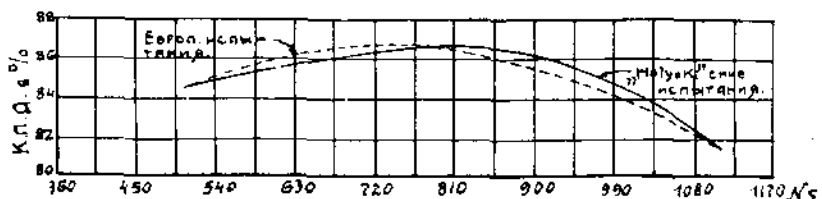
Последние стали разрабатываться и в Америке фирмой Morgan Smith, взявшей патент на С.-А.С.Ш. и Канаду.

Результат дальнейшей разработки этого типа уже в Америке характеризуется следующими данными: максимум к. п. д. при $n_s = 780$ — 90%, к. п. д. при половинной нагрузке — 70%.

Испытания производились в Holyok'ской лаборатории.

Достигнутые результаты значительно выше европейских. В связи с распространенным одно время мнением, что к данным

американских испытаний нужно относиться с большой осторожностью, так как будто бы наблюдались случаи, когда американские турбины, привезенные в Европу, давали здесь результаты худшие, чем полученные на них же в Америке, приводим характеристики одной и той же турбины по данным европейских и американских испытаний (фиг. 14).



Фиг. 14.

С целью выяснить влияние характеристик турбин на экономичность работы станции „А Jessop“ построил кривые зависимости среднего к. п. д. турбины Френсиса,¹ с $n_s = 335$ и вышеприведенной винтовой $n_s = 780$ от числа единиц установки² (фиг. 15).



Фиг. 15.

Даваемая турбиной Френсиса экономия уже при 4 агрегатах не превышает 5%. Это при нормальном напоре. Уменьшение его ставит турбину Френсиса в значительно худшие условия, и отдача

¹ Средний к. п. д. есть отношение суммарного количества энергии, вырабатанной турбиной за известный период, к общему количеству энергии, потребленной ею за этот период.

² Power. 24 марта 1925 г.

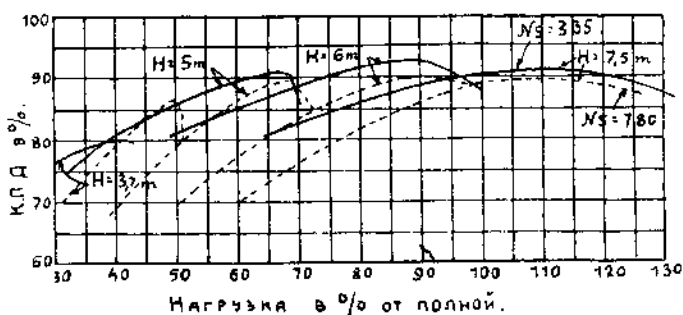
ее и мощность становятся на много ниже соответствующих значений у винтовой турбины (фиг. 16).

На ряду с развитием новых типов турбин начинается чрезвычайно быстрый прогресс в области усовершенствования быстроходных турбин Френсиса. Первые признаки этой тенденции уже заметны в новейших быстроходах фирмы Escher Wiss.

Данные, опубликованные известной американской компанией The James Leffel Co,¹ указывают на колоссальный скачок в этой области.

Новейшие модификации колес Френсиса типа „Z“ имеют максимум к. п. д. 89% при $n_s = 784$.

К сожалению, не зная формы рабочей характеристики этого типа, мы не можем сделать окончательные выводы, но во всяком



Фиг. 16.

случае факт достижения турбиной Френсиса с $n_s = 780$ максимум к. п. д. 89% чрезвычайно многозначителен и говорит за то, что турбина Френсиса стремится вновь завоевать себе прежнее положение и встать на ряду с лучшими типами быстроходных гидравлических двигателей.

Таковы главнейшие достижения в области гидравлических двигателей. Все вышеуказанное говорит, что пути их в Европе и Америке не совсем одинаковы. В то время, как первая уделяет большое внимание турбинам с поворотными лопатками, Америка стремится разрешить проблему создания пологой характеристики, не усложняя механизма двигателя. В этом отношении сыграло большую роль улучшение формы всасывающей

¹ H. Taylor—The hydraulic Reaction Turbin. The Transactions of the first World Power Conference. Vol. II.

трубы. Кроме того полученные нами последние сведения говорят о значительном улучшении формы характеристик благодаря впуску воздуха во всасывающую трубу при мощности двигателя меньшей нормальной. Насколько удастся Америке следовать в этом направлении и дальше, покажет будущее, но во всяком случае уже достигнутое является лучшей гарантией успеха.

АСИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ.

В. Т. Касьянов.

В русской электротехнической литературе вопросу об асинхронных генераторах уделено недостаточно внимания, в особенности в части чисто практической, касающейся способов включения их и проч.

Между тем асинхронные генераторы во многих случаях могут быть с пользой применены как во вновь сооружаемых электрических станциях, так и в уже существующих, при их расширении.

В виду этого автор статьи задается целью попытаться пополнить часть этого пробела, пользуясь как данными довольно обширной иностранной литературы по этому вопросу, так и личным опытом по установке и эксплуатации асинхронных генераторов трехфазного тока.

Известно, что каждый асинхронный двигатель трехфазного (а равно и однофазного) тока может работать не только как двигатель, но и как генератор.

Для осуществления такой генераторной работы нужно асинхронный двигатель, включенный нормальным образом в сеть, вращать помощью какого-либо двигателя со скоростью несколько большей его нормальной скорости. Чем больше будет это превышение скорости сверх нормальной (в пределах устойчивой работы), тем большую электрическую мощность он будет отдавать в сеть.

Не вдаваясь в рассмотрение теории асинхронного генератора, что сделано различными авторами с достаточной полно-

той,¹ мы изложим вкратце основные свойства и особенности его работы с тем, чтобы далее перейти к чисто практической, эксплуатационной стороне вопроса.

Асинхронный генератор не может работать на сеть самостоятельно; необходимо, чтобы параллельно с ним была включена в ту же самую сеть синхронная машина (синхронный генератор, синхронный двигатель или синхронный конденсатор), которая поддерживает в сети напряжение и доставляет асинхронному генератору намагничивающий ток для создания в нем магнитного поля, короче — для возбуждения его.

Таким образом напряжение сети поддерживается и регулируется возбуждением индукторов синхронной машины, которая при этом может работать или как генератор, доставляя электрическую энергию внешней цепи совместно с асинхронным генератором, или как двигатель, заимствуя электрическую энергию от асинхронного генератора и превращая ее в механическую.

Вследствие того, что асинхронный генератор получает возбуждение от сети, обслуживание его очень упрощается; будучи включен в сеть, он, подобно асинхронному двигателю, почти не требует никакого ухода.

Включение асинхронного генератора в работающую уже сеть, как увидим далее, также чрезвычайно просто.²

¹ По вопросу об ас. генераторах имеется довольно обширная литература. Из целого ряда журнальных статей, монографий и проч. можно указать на следующие:

E. Arnold — Die Wechselstromtechnik. Bd. V, изд. 1909.

C. Feldman — Asynchrone Generatoren. Изд. J. Springer. 1903.

A. Allister — Alternating Current Motors. New-York. 1909.

H. M. Hobart and E. Knowlton — The Squirrel-Cage Induction Generator. Pt. A. I. E. E. 1912. Стр. 1045.

Kyser — Elektrische Kraftübertragung. Изд. 1920.

В статье Hobart'a имеется довольно большой библиографический указатель по данному вопросу.

² Эти качества асинхронного генератора — возбуждение от сети и несложность включения в сеть — открывают ему обширную область применения в гидроэлектрических станциях небольшой мощности, работающих в сеть более крупных — паровых или гидравлических — станций. Подобные станции устраиваются даже автоматическими, т.-е. работающими без обслуживающего персонала.

См. El. World. 1914. Vol. 63. Стр. 812, Hydroelectric Plant with Induction Generator, а также: La Houille Blanche 1924. Mai—Juin стр. 91. L'exploitation rationnelle et économique des stations hydroélectriques à l'aide de génératrices asynchrone.

Недостатком асинхронного генератора, кроме отсутствия собственного возбуждения, является то обстоятельство, что его коэффициент мощности довольно низок и колеблется в пределах 0,9 — 0,8 и даже ниже, в зависимости от величины нагрузки и качества самой машины.¹

Этими двумя обстоятельствами определяется роль асинхронного генератора как подсобного, вспомогательного генератора электрической энергии.

Несмотря на упомянутые недостатки, асинхронный генератор часто с пользой может быть применен, в особенности в осветительных сетях, как для работы на основную нагрузку, так и для снятия пиков ее, в зависимости от местных условий.

В сетях по преимуществу силовых, в которых $\cos\phi$ обыкновенно бывает низок, асинхронный генератор менее удобен, так как еще более снижает $\cos\phi$ главных (синхронных) генераторов.

В практике европейских и американских электрических станций имеются многочисленные примеры применения асинхронных генераторов довольно крупных мощностей.² На одной из Нью-Йоркских станций были установлены 2 асинхронных турбогенератора по 7500 kW , 11 000 вольт, с короткозамкнутыми роторами.

Результаты эксплуатации их оказались настолько хорошими, что были установлены еще три асинхронных турбогенератора такой же мощности — 7500 kW каждый.³

Рассмотрение и оценка асинхронного генератора с общей экономико-технической точки зрения — в силу обширности этой темы — выходит из рамок настоящей статьи,⁴ а потому, переходя к непосредственной теме статьи и имея в виду наши русские условия, мы рассмотрим с чисто электрической стороны установку асин-

¹ В настоящее время можно иметь асинхронные генераторы с $\cos\phi$ равным единице и даже асинхронные генераторы, доставляющие в сеть безваттный (намагничивающий) ток (см. *Neuere Fortschritte auf dem Gebiete der Asynchron-Generatoren*. E. T. Z. 1924, стр. 1265); но эти генераторы являются уже специальной, сложной машиной и с точки зрения темы нашей статьи едва ли могут представлять интерес.

² См. E.T.Z. 1907, стр. 1005.

L'Electricien. Avril 1924. Une grande usine marémotrice.

³ E.T.Z. 1913, стр. 318.

EI. und Maschinenbau. 1913, стр. 8 и стр. 119.

EI. Kraftbetriebe und Bahnen. 1912, стр. 709.

⁴ Интересующихся этим вопросом отсылаем к двум последним авторам в списке в начале статьи.

хронного генератора на частном примере двух небольших установок, выполненных по мысли автора в г. Бодайбо Иркутской губ. в 1920 г.

Этот небольшой городок является административным центром приискового района, принадлежавшего до революции Акционерному Обществу „Ленское Золотопромышленное Товарищество“. Он является также и транзитным пунктом всего района, так как расположен на судоходной реке Витиме и соединен узкоколейной железной дорогой с приисками, где производится добыча золота.

Перед революцией в депо этой железной дороги, находящемся в г. Бодайбо, была построена электрическая станция трехфазного тока для обслуживания мастерских депо, лесоподъемных устройств (для выгрузки из реки сплавного леса) и подъемного крана на 5 *t* (для разгрузки барж).

Станция имеет воздушную линию на 5000 *V*, длиной около 5 *km*, и оборудована двумя генераторами: первый 60 *kW* 5000 *V* приводится в движение локомотивом помощью ременной передачи; второй — 140 *kW* 160 *V* должен был работать параллельно с первым через трансформатор, но по условиям того времени паровая машина для этого второго генератора не была доставлена, и он оставался в бездействии.

Первый (малый) генератор не мог удовлетворить потребность в электрической энергии и приходилось выискивать какой-нибудь выход из создавшегося положения.

После предварительных опытов, произведенных с небольшим асинхронным двигателем, решено было применить асинхронный генератор, при чем в качестве двигателя для него использовали вертикальную паровую машину, непосредственно соединенную с генератором постоянного тока в 45 *kW*; этот агрегат до постройки станции трехфазного тока работал на осветительную сеть депо, а после окончания постройки бездействовал.

В качестве асинхронного генератора был использован асинхронный двигатель 85 *HP* 220 *V* 210 *A* 585 об/мин (600 синхронных), доставленный с приисков и снятый там с бездействовавшего шахтного подъемника.

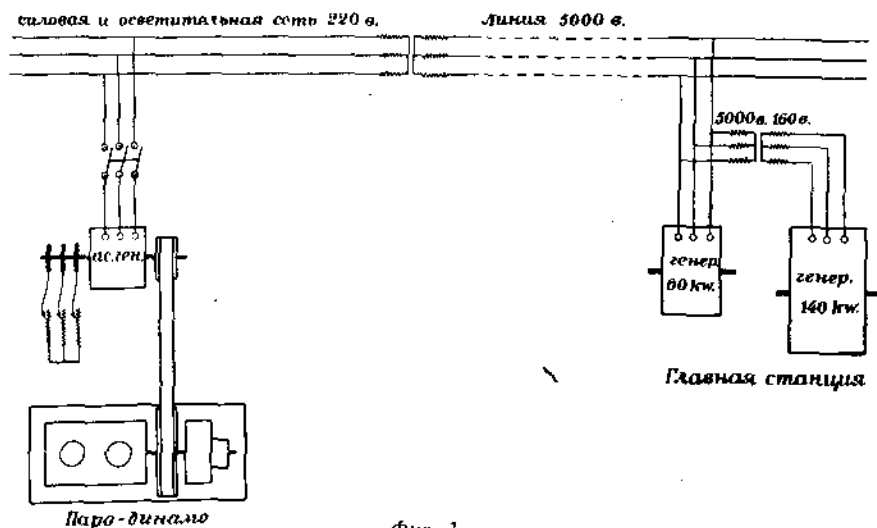
Этот двигатель был установлен вблизи упомянутой выше паро-динамо и соединен с маховиком последней помощью ремня (фиг. 1). Динамо постоянного тока оставалась соединенной с валом паровой машины, но щетки ее были подняты с коллектора во избежание лишнего трения.

Асинхронный генератор включался непосредственно в распределительную сеть 220 В.

Как видно из фиг. 1, схема включения в сеть асинхронного генератора очень проста (на схеме опущены только измерительные приборы и предохранители).

Для обслуживания всей установки требовался только один машинист у паровой машины, так как асинхронный генератор, будучи включен в сеть, не требовал за собою никакого надзора.

Включение асинхронного генератора на параллельную работу с главной станцией производилось следующим образом: паровая

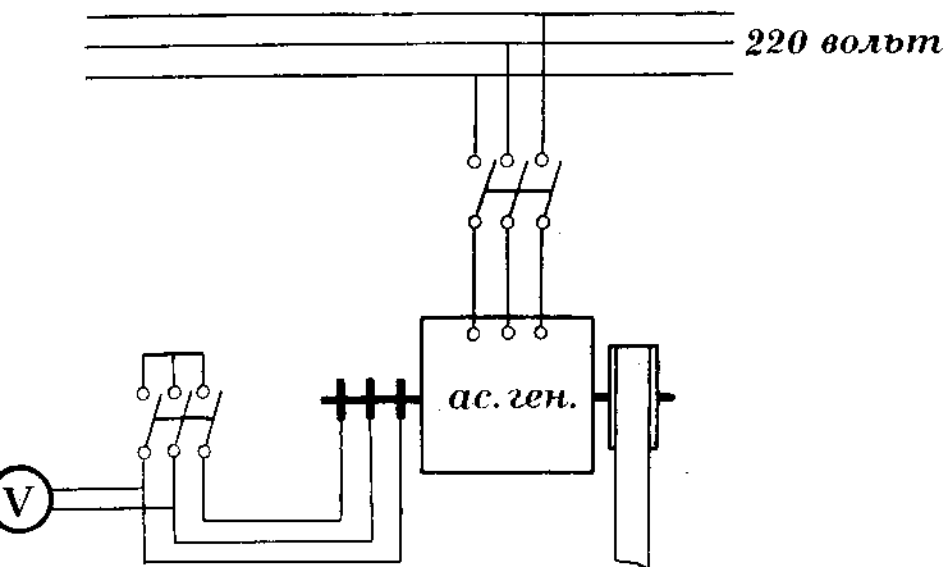


Фиг. 1.

машина пускалась в ход, при чем ротор генератора, благодаря соответствующему подбору шкива, получал скорость 610—612 об. в минуту, т.-е. скорость большую синхронизма. После этого замыканием рубильника статор генератора приключался к сети; затем обыкновенный пусковой реостат, приключенный к контактным кольцам машины, постепенно выводился из цепи ротора; при этом асинхронный генератор плавно и без толчков принимал на себя нагрузку, несколько снижая число оборотов. Описанный способ является наиболее простым и удобным; в первое же время работы станции включение асинхронного генератора производилось несколько более сложным образом: три провода от контактных колец генератора были подведены к нижним зажимам трехполюсного рубильника (фиг. 2), верхние зажимы которого были соединены накоротко.

К двум проводам, идущим от контактных колец, присоединялся вольтметр постоянного тока типа Де пре д'Арсонваля. Такой вольтметр, как известно, реагирует только на постоянный ток.

Паровая машина пускалась в ход с несколько пониженной скоростью; затем статор машины включался в сеть, рубильник же в цепи ротора оставался открытым. Скорость машины постепенно увеличивалась путем медленного открывания парового вентиля, при этом частота напряжения на кольцах ротора, соответствующая разности скорости вращения магнитного поля статора и скоро-



Фиг. 2.

сти ротора, также уменьшалась; когда она падала до 2—3 периодов в секунду, стрелка вольтметра начинала обнаруживать небольшие качания около нулевого положения; по мере приближения скорости ротора к синхронизму размахи стрелки уменьшались и в момент синхронизма стрелка неподвижно останавливалась на нуле.

В этот момент включался рубильник, замыкающий накоротко цепь ротора, после чего, путем дальнейшего открывания вентиля, паровой машине давался полный приток пара и этим самым генератор нагружался.

Включение может быть произведено также и со стороны статора при замкнутом накоротко роторе, при чем момент син-

хронизма может быть определен по тахометру, так как фаза ротора (т.е. его относительное положение к статору) в данном случае не имеет значения. Этот последний способ и применялся на упомянутой ранее Нью-Йоркской станции.

Для выключения генератора по первому способу следует ввести реостат в цепь ротора и тогда уже выключить статор; по второму же и третьему способу сначала следует снять с генератора нагрузку путем уменьшения притока пара к машине и только после этого отключить от сети статор.

Описанная вспомогательная асинхронная станция, отдававшая в сеть 40—42 kW , на первое время устранила затруднения, связанные с недостатком электрической энергии, при чем, благодаря использованию бездействовавших машин, все это удалось сделать с минимальными затратами, которые в сущности сводились только к установке мотора на легкий деревянный фундамент.

Однако же через несколько месяцев, вследствие расширения осветительной сети и проч., опять стал обнаруживаться недостаток мощности станции.

Вопрос был решен установкой точно такого же асинхронного генератора, при чем в качестве двигателя для него была использована паровая машина в 90 HP, приводившая в движение трансмиссию лесопильного завода, которая работала только днем, да и то только с малой нагрузкой.

Завод этот находился в районе распределительной сети 220 V, а потому расходы по устройству этой второй станции опять свелись к установке мотора, снятого с шахтного подъемника.

Так как малый генератор (60 kVA) главной станции слишком перегружался безваттным током, который потребляли оба асинхронных генератора и асинхронные двигатели, работавшие от сети, то на главной станции пришлось пустить в ход большой генератор (140 kVA).

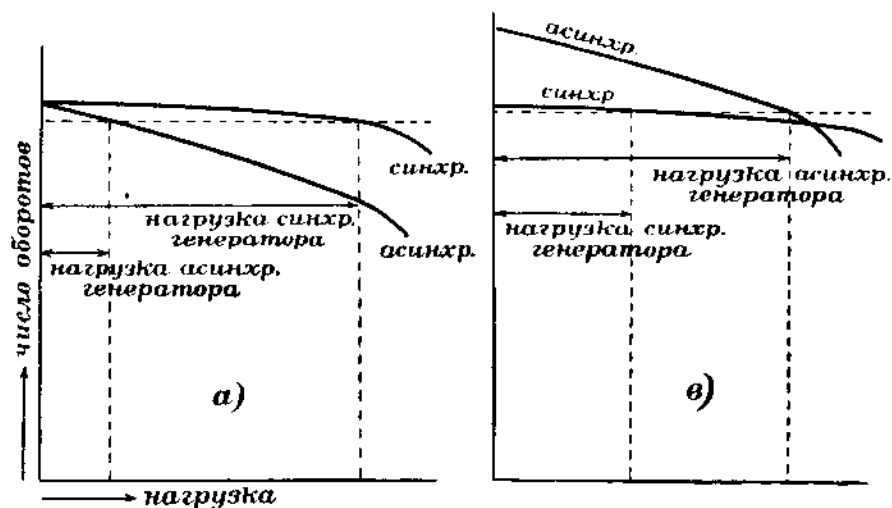
К счастью, расположение генераторов было в одну линию со шкивом локомотива, и вопрос решился просто подбором подходящего шкива для большого генератора и постановкой более длинного ремня для соединения большого генератора с локомотивом. Действительная мощность большого генератора была при этом около 50% нормальной, тогда как кажущаяся мощность, вследствие низкого $\cos\phi$, достигала 75—85% нормальной величины.

С экономической точки зрения работа описываемой комбинации машин была не безупречна, так как потери при этом были

более значительны, но в общем и целом это было хорошим выходом из трудного положения.

Чувствительность регуляторов паровых машин синхронного и асинхронного генераторов была различна. Характеристики этих регуляторов (т.е. кривые, показывающие уменьшение числа оборотов машины при увеличении нагрузки) изображены на фиг. 3а, при чем, ради ясности, расхождение характеристик показано в преувеличенном виде.

Как видно из рисунка, при нагружении генераторов синхронный генератор перенимал на себя почти всю нагрузку, и паровая машина его быстро достигала своей предельной мощности.



Фиг. 3.

Дальнейшее возрастание нагрузки ложилось уже на асинхронный генератор, который, в силу значительного наклона характеристики его регулятора, начинал сильно уменьшать свою скорость. Так как при этом синхронный генератор, по причине перегруженности паровой машины, не мог удерживать свою нормальную скорость, то частота тока оказывалась в полной зависимости от мало чувствительного регулятора у асинхронного генератора и испытывала резкие колебания, которые в эти моменты еще более увеличивались вследствие увеличения скольжения асинхронного генератора. Эти колебания частоты и напряжения являлись, конечно, очень нежелательными. Для устранения их были подтянуты пружины регулятора у двигателя асинхронного генератора; этим

самым характеристика его была поднята (фиг. 3в), иначе говоря, машина была установлена на большее число оборотов холостого хода.

Вследствие этого при включении асинхронного генератора на параллельную работу он сразу брал на себя полную нагрузку, соответствующую полной мощности его машины (см. фиг. 3в), а потому все колебания нагрузки воспринимались синхронным генератором, и, в силу пологой характеристики его регулятора, изменения частоты стали незначительными.

Вскоре после пуска в ход второй вспомогательной станции выяснилась необходимость немедленной смены дымогарных труб парового котла локомотива на главной станции, что угрожало, при местных средствах ремонта, остановкой последней на срок не менее месяца.

С выходом из строя главной станции должны были остановиться мастерские депо, подъемный кран и лесоподъемники, что угрожало слишком тяжелыми последствиями для приисков.

Поэтому, после предварительных опытов, было решено ремонтировать паровой котел главной станции, и в то же время продолжать работу электрической сети, поддерживая в действии оба асинхронные генератора и возбуждая их синхронным двигателем, каковым служил большой генератор главной станции, пущенный вхолостую.

Теоретическое обоснование такой работы асинхронного генератора можно найти в указанных ранее источниках, здесь же мы рассмотрим только способы осуществления этого режима, упомянув при этом, что при рассматриваемом режиме частота тока, всегда неразрывно связанная со скоростью вращения синхронной машины, все же оказывается в полной зависимости от регулятора машины при асинхронном генераторе, так как при увеличении нагрузки асинхронный генератор уменьшает свою скорость, и синхронная машина, идущая как двигатель, а не как генератор, также вынуждена уменьшить свою скорость.

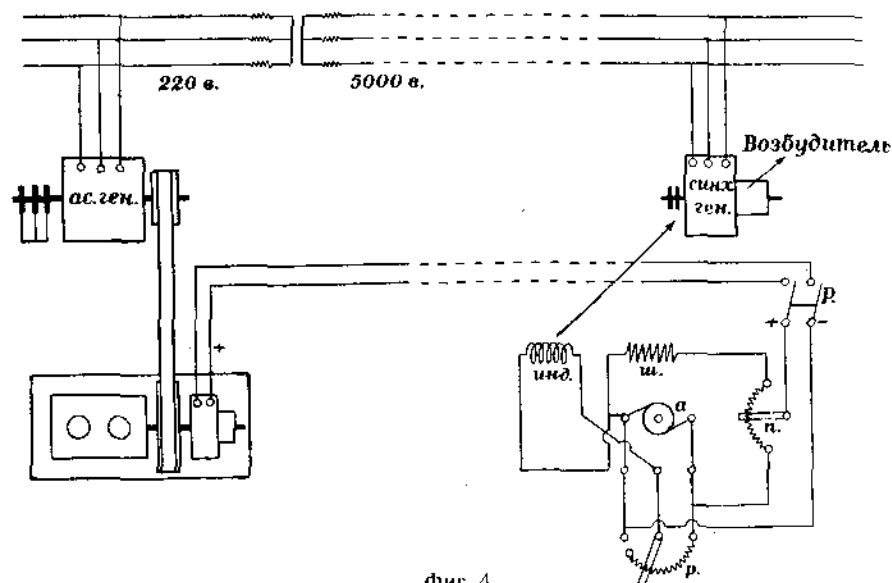
Следует заметить, что даже при очень чувствительном регуляторе первичного двигателя, при рассматриваемом режиме колебания частоты при изменениях нагрузки будут довольно значительны, вследствие увеличения скольжения асинхронного генератора, происходящего за счет уменьшения частоты.

В описываемой установке пуск в ход асинхронного генератора производился следующим образом.

Паро-динамо первой асинхронной станции пускалась в ход, щетки ее генератора постоянного тока опускались на коллектор, и он возбуждался до нормального напряжения.

По особым проводам (фиг. 4) постоянный ток от этой машины передавался на главную станцию.

Возбудитель синхронного генератора этой станции, сидящий на одном валу с ним, пускался в ход в качестве мотора постоянного тока и помощью его синхронный генератор (со снятым со



Фиг. 4.

шкива ремнем) разгонялся до скорости, превышающей его нормальную скорость.

Асинхронный генератор на первой станции в это время вращался с нормальным числом оборотов, будучи присоединен к сети обычным образом, и с замкнутым накоротко ротором.

В индуктора разогнанного синхронного генератора постепенно включался возбуждающий их постоянный ток, в трехфазной сети возникало напряжение, асинхронный генератор получал возбуждение, и устанавливалась нормальная работа системы.

Постоянный ток, служивший для разгона синхронного генератора, становился более ненужным и выключался помощью рубильника P (фиг. 3). На фиг. 3 a — обозначает якорь возбудителя, $ш$ — шунтовая обмотка возбудителя, $п$ — пусковой рео-

стат, p — регулировочный реостат индукторов синхронного генератора и *инд.* — обмотка индукторов того же генератора.

Как видно из рисунка, схема выполнена таким образом, что выключение рубильника P (после того как асинхронный генератор получил возбуждение и начал работать на сеть) не прерывает питания индукторов генератора постоянным током; это питание будет производиться теперь за счет работы возбудителя, который выключением рубильника P переводится с двигательного режима на генераторный и получает механическую энергию от синхронной машины, работающей теперь как двигатель.

В литературе имеются указания на возможность двух других способов пуска в ход установок, подобных рассматриваемой,¹ а именно:

Индукторам синхронного двигателя (или генератора), подлежащего пуску в ход, дается нормальное возбуждение от постороннего источника постоянного тока, при чем как синхронный, так и асинхронный генераторы присоединяются обычным образом к сети, из которой должна быть выключена вся нагрузка. Асинхронному генератору сообщается медленная скорость вращения, постепенно возрастающая; в это время индукторам синхронной машины дается толчок в сторону нормального вращения; при этом в цепи возникает небольшой ток, который дает небольшое возбуждение асинхронному генератору.

Таким образом система начинает возбуждаться, синхронная машина увеличивает свою скорость, следуя за увеличением скорости асинхронного генератора, и скоро устанавливается нормальная работа обеих машин.

Другой способ состоит в том, что асинхронный генератор пускается с полной скоростью, но в ротор его вводится сопротивление. Возбужденным индукторам синхронной машины сообщается толчок в сторону нормального движения и в это же время сопротивление из цепи ротора асинхронного генератора начинают постепенно выводить; при этом синхронная машина ускоряет свой ход и быстро достигает нормального числа оборотов.

При таком режиме, т. е. при возбуждении асинхронного генератора идущим вхолостую синхронным двигателем, описываемая установка работала около двух месяцев на моторную и осветительную нагрузку.

¹ E. Clark. — Starting polyphase motors. The Electrician 1924, № 2425.

Случалось, что при сильных перегрузках, когда дежурный у щита синхронной машины не успевал во-время подрегулировать ее напряжение между ней и асинхронным генератором протекали большие безваттные токи, которые еще более понижали напряжение; при этом синхронная машина останавливалась, и асинхронный генератор терял возбуждение. Приходилось снова повторять вышеописанный пуск в ход. Но в общем и целом весь этот двухмесячный опыт прошел очень удачно.

Рамки настоящей статьи, к сожалению, не позволяют остановиться на ряде интересных наблюдений, сделанных при работе асинхронного генератора при описанном режиме.

Из только что изложенного примера следует, что при известных условиях асинхронные генераторы могут быть весьма полезны, в виду крайней простоты их установки и возможности использовать для них каждый асинхронный двигатель подходящей мощности.

Случаи, подобные вышеописанному, часто встречаются в практике ведения наших энергетических хозяйств, особенно провинциальных, и в этих случаях, при обсуждении возможных их решений, всегда следует рассмотреть вариант, заключающий в себе применение асинхронных генераторов.

К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ОСВЕЩЕНИИ ФАБРИК И ЗАВОДОВ.¹

Инж.-электрик *М. В. Соколов.*

Необходимость устройства хорошего освещения.

В настоящее время наблюдается все возрастающий интерес к вопросу о рациональном устройстве освещения как естественного, так и искусственного.

Во многих странах З. Европы и Америки организованы осветительные общества, объединяющие работников этой области. Они широко развернули свою деятельность, созывая периодические съезды и конференции, организуя разработку ряда специальных вопросов, а также стандартов и правил освещения, издавая журналы и т. д. У нас в СССР благодаря работам Комиссии по Осветительной Технике при ЦЭС'е, а также трудам отдельных специалистов этому вопросу начинают уделять все большее внимание.

В связи с развертыванием нашей промышленности на первое место среди других вопросов осветительной техники выдвигается вопрос о рациональном освещении помещений для работы, как играющий видную роль в деле организации труда. Резюмируя богатый материал, имеющийся в русской и иностранной литературе по этому вопросу, можно прийти к следующему выводу: устройство хорошего освещения помещений для работы является безусловно необходимым как с точки зрения охраны здоровья и безопасности рабочих, так и из соображений экономической выгоды, так как оно:

1. Повышает производительность труда.
2. Улучшает качество продукции.
3. Уменьшает количество брака.

¹ Доклад, сделанный в семинарии по светотехнике при Ленинградском Политехническом Институте им. Калинина 12 декабря 1925 г. (в расширенном виде).

4. Сокращает число несчастных случаев.
5. Предотвращает порчу зрения.
6. Уменьшает усталость глаз и улучшает общее самочувствие рабочего.
7. Способствует поддержанию порядка и чистоты в помещении.
8. Облегчает надзор.

Под „хорошим освещением“ следует понимать такое, которое удовлетворяет следующим требованиям:

1. Достаточная величина освещенности.
2. Равномерность ее.
3. Отсутствие резких теней, мешающих работе.
4. Отсутствие блескости, т.-е. ослепления глаз благодаря наличию в поле зрения поверхностей с резко выделяющейся яркостью.
5. Постоянство величины освещенности.
6. Надежность действия.

В различных странах разработаны правила, точно определяющие требования, предъявляемые к освещению при различного рода работах, а в некоторых штатах Сев. Америки они уже введены в жизнь законодательным путем. У нас в СССР соответствующий проект был разработан по поручению Комиссии по осветительной Технике при ЦЭС^е инж. П. М. Тиходеевым¹ и в ближайшее время (в несколько измененном виде) должен быть утвержден законодательными органами для обязательного проведения в жизнь.

В дальнейшем изложении мы будем говорить исключительно об электрическом освещении помещений для работы, не затрагивая вопросов о газовом, керосинокалильном, а также и об естественном освещении, как выходящих из рамок нашей статьи.

Обследование существующего освещения.

Всякий, кому приходилось работать или хотя бы проходить по мастерским наших заводов в вечерние часы, согласится с тем, что за редкими исключениями электрическое освещение находится в весьма печальном состоянии. Маломощная пустотная („экономическая“) лампа с плоским колпаком, покрытая обычно слоем пыли, висит непосредственно перед глазами рабочего и не столько

¹ Электричество, стр. 372—382, № 7—8, 1923 г.

светит, сколько ослепляет его. Газополная („полуваттная“) лампа в арматуре с прозрачным стеклом или совсем без нее применена для общего освещения. Общая скудость и резко выраженная неравномерность освещения, — вот что можно наблюдать почти на любом из наших заводов, особенно в провинции. Наглядным примером могут служить результаты обследования электрического освещения, произведенного автором осенью 1925 г. на заводе „Севкабель“ по поручению заводууправления, совместно с инж.-электриком Н. С. Пестовским и техником Ленинградского Отделения ГЭТ'а Л. Е. Слухай-Натальченко. Следует заметить, что этот завод считался в Ленинграде одним из лучших в отношении устройства электрического освещения. И, однако, наблюдения, фотометрирование и измерение колебаний напряжения показали, что дело и здесь обстоит далеко не благополучно.

1. С точки зрения величины освещенности было обнаружено во многих случаях значительное несоответствие между действительностью и требованиями норм в сторону недостаточной освещенности. Так, например, на алмазном станке для волочения проволоки диаметром с 1,0 на 0,1 *mm* средняя освещенность оказалась равной 21 *лк.* (люксу), в то время как по проекту русских норм¹ она должна быть для подобного рода работы (по разряду 16) 75 *лк.* Германский Осветительный Кодекс² считает желательным в подобных случаях от 80 до 220 *лк.*, Американский Кодекс³ — от 108 до 215 *лк.* При этом соотношение между средней освещенностью, создаваемой на рабочей поверхности станка лампой местного освещения, и общей средней освещенностью было

$$\frac{15}{6} = 2,5,$$

тогда как по проекту русских правил оно должно быть не более единицы.

В группе станков, имеющих дело с шелком, были обнаружены местами освещенности, во много раз превосходящие всякие нормы. Так, на станке для перемотки, просмотра и ремонта проволоки с шелковой изоляцией освещенность на катушке (при

¹ П. М. Тиходеев. — Проект правил освещения помещений для работы. Эл-во, № 7—8, 1923.

² The Illuminating Engineer. The Journal of Good Lighting (London), стр. 96—97, апр. 1925, стр. 130—132, май 1925.

³ Нормы освещенности пром. предприятий. Пер. с англ., изд. „Вопросы Труда“, М. 1925.

лампе в 150 *W* с глубоким коническим колпаком на высоте 20 *см* над нею) оказалась равной 5100 *лк*. Освещенность такого же порядка (ок. 5000 *лк*.) была обнаружена на катушках с изолированной проволокой у шелкообмоточных станков, когда работница при просмотре проволоки подносит лампу такой же мощности на расстоянии 15 — 20 *см* от катушки. Эти необычно большие освещенности вызываются чрезвычайно малыми размерами рассматриваемых предметов; так, например, при ремонте проволоки с шелковой изоляцией работнице приходится иметь дело с проволокой диаметром до 0,05 *мм* и шелком (обычно темных цветов) толщиной от 0,025 до 0,015 *мм*.

Следует заметить, что освещенность такого порядка вовсе не является невыносимой для глаза. Так, нами была измерена освещенность под открытым небом в 12 ч. дня 14 ноября при пасмурной погоде — 4800 *лк*. Освещенность, создаваемая в наших широтах лучами полуденного летнего солнца, достигает 115000 *лк*.¹ для освещения витрин магазинов в дневные часы англичане применяют специальные осветительные приборы, создающие освещенность при расстоянии 1,2 *м* от них порядка 10000 *лк*.²

2. В отношении равномерности освещения рабочей поверхности в большинстве случаев было установлено также резкое несоответствие с требованиями проекта русских правил. Так, на том же алмазном станке отношение максимальной освещенности рабочей поверхности и минимальной оказалось равным

$$\frac{28}{6} = 4,7,$$

в то время как оно не должно быть больше двух.

3. Неправильное соотношение между местным и общим освещением или полное отсутствие последнего являлось причиной наличия во многих случаях резко очерченных и темных теней, мешающих работе. (Тень считается темной тогда, когда ее освещенность менее $\frac{1}{4}$ освещенности рабочей поверхности).

4. Если блескость является одним из самых распространенных недостатков осветительных установок, то на заводе „Севкабель“ в этом отношении дело обстоит особенно неблагоприятно. Необходимость создания для ряда производственных процессов чрезвычайно большой освещенности заставила применять мощные газополные лампы, располагая их непосредственно у рабочей по-

¹ По измерениям П. М. Тиходеева.

² Illum. Eng. (London), стр. 267, октябрь, 1925.

верхности в расстоянии от глаза рабочего до 20 см. Чтобы составить представление о порядке яркости, с которой мы здесь имеем дело, приведем данные об яркости некоторых светящихся и освещенных поверхностей (табл. I).

ТАБЛИЦА I.

Яркость некоторых источников света и освещенных поверхностей.

Название.	Яркость ¹ св./см ² .	Источник.
Неоновая («тлеющая») лампа, основанная на свечении газа между двумя электродами	0,02	2
Пламя стеариновой свечи	0,6	1
Пламя керосиновой лампы	0,6—1,4	2
Газополная («полуваттная») лампа с колбой из молочного стекла 60 W	1,1	6
Газополная («полуваттная») лампа с колбой из молочного стекла 200 W	2,1	6
Белая бумага с коэффициентом отражения 0,7 в лучах полуденного солнца (115 000 ак.)	2,6	
Нить угольной лампы	63—72	3
Нить пустотной («экономической») лампы	135—200	3
Солнце на горизонте	ок. 360	4
Нить газополной лампы 75 W	546	5
Нить газополной лампы 200 W	778	5
Кратер открытой дуговой лампы с угольными электродами	ок. 30 000	2
Солнце в зените	90 000—135 000	2
Кратер дуговой лампы Lummer'a (Темпер. 7600° abs., давление 22 атм.)	284 000	2

¹ Здесь, как и в дальнейшем, под сокращением: «св.» я подразумеваю международную свечу.

² Руководство Сименса.— Электрическое оборудование световых и силовых установок. Берлин, 1924, стр. 3.

³ W. Otto, Dr.-Ing.— Einrichtung electrischer Beleuchtungs-Anlagen. Leipzig, 1923, стр. 25—26.

⁴ L. Bloch, Dr.-Ing.— Lichttechnik. München-Berlin, 1921, стр. 541.

⁵ W. E. Forsythe.— The Temperature and Brightness of Tungsten Lamps, G. E. R. стр. 830, 1923.

⁶ Jones— Opal Bulb and White-Sprayed Lamps. Illum. Eng. (London), стр. 43, февраль, 1925.

Из этих данных мы видим, насколько велики значения яркости для современных источников света — электрических ламп с вольфрамовой нитью — по сравнению со свечей, керосиновой и даже угольной лампой. Поэтому правила освещения предусматривают необходимость защиты глаза от блескости, создаваемой наличием в поле зрения поверхностей со столь большой яркостью. Так, Германский Осветительный Кодекс не допускает для местных светильников (осветительных приборов для местного освещения) яркости более $0,7 \text{ св./см}^2$, и для общих светильников — более $4,5 \text{ св./см}^2$ в том случае, когда угол между линией от глаза к источнику света и горизонтальной плоскостью меньше 30° . Проект русских норм предусматривает еще более строгие ограничения. В этом отношении существующее освещение на заводе „Севкабель“ дает особенно резкое расхождение с требованиями, предъявляемыми к хорошему освещению.

5. В отношении постоянства величины освещенности произведенные наблюдения показали колебания напряжения в осветительной сети в течение рабочего времени от 207 до 220 V (моторная и осветительная сеть питаются от общих трансформаторов).

Не следует забывать, что при лампах на 220 V такое понижение напряжения (на 6%) влечет за собою не только уменьшение светового потока на 19% , но и уменьшение световой отдачи (выражаемой в люменах¹ на 1 ватт) на 13% , что ясно из кривых фиг. 1.

Эти колебания силы света иногда столь резки, что бывают заметны на глаз, почему следует признать безусловно более желательной установку отдельных трансформаторов для осветительной сети.

6. Запасное освещение (освещение безопасности) на заводе имеет отдельную проводку от шин подстанций. Это удовлетворяет требованиям Американского Осветительного Кодекса, в то время как проект русских правил предусматривает необхо-

¹ Люмен (лм.) есть единица светового потока.

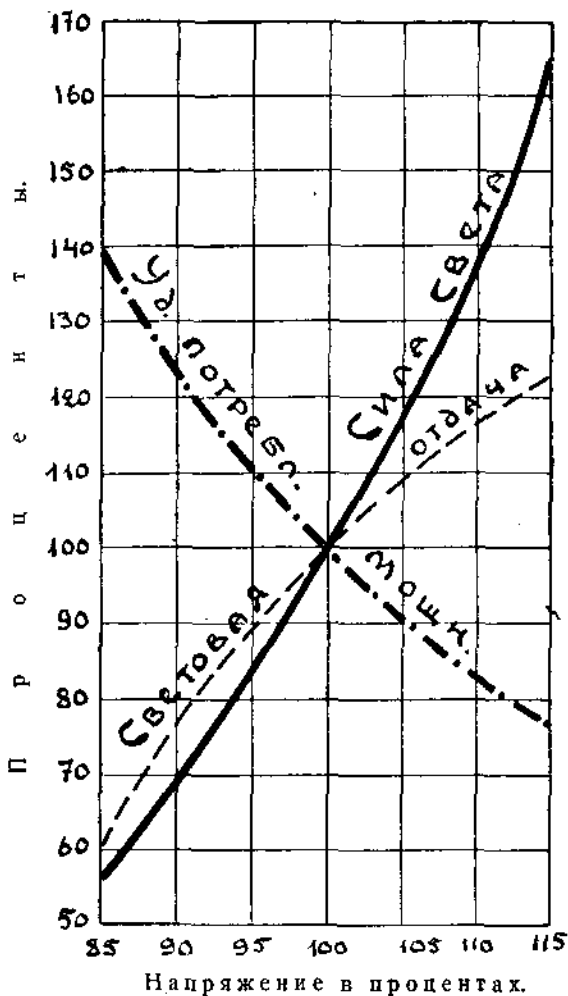
Люмен равен потоку, испускаемому внутри телесного угла, равного единице, точечным, одинаково по всем направлениям светящимся источником света, силою в 1 международную свечу.

Таким образом, источник света силою в одну среднюю сферическую свечу испускает $4\pi = 12,57 \text{ лм.}$

димность питания запасного освещения от независимого источника энергии.

Подробное обследование освещения на ряде ленинградских фабрик и заводов было

произведено в течение 1925 г. инж. П. М. Тиходеевым.¹ Обследовано было 15 типичных предприятий с общим количеством рабочих более 20 000 человек. Результаты, по моему мнению, получились еще более печальные, чем приведенные выше данные о заводе „Севкабель“. Обычные величины общей освещенности при электрическом освещении наблюдались в пределах от 1 до 10 лк., реже от 10 до 20. Правда, под лампами местного освещения освещенность достигла 200 и даже 300 лк., но к краю той же рабочей поверхности она составила всего 20—30, а то и менее люксов. Освещенность же в проходах колебалась в пределах 0,1—5 лк, падая порою до 0,01 лк. (Для сравнения напомним, что свет луны в полнолуние создает ок. 0,2 лк. М. С.) Почти повсюду было установлено наличие блескости



Фиг. 1. Характеристики электрических ламп накаливания с вольфрамовой нитью.²

Почти повсюду было установлено наличие блескости

¹ Эл-во, стр. 136—142, № 3, 1926.

² F o w l e. — Standard Handbook for Electrical Engineers. New-York, 1922, стр. 1128.

несоответствие фактического напряжения сети номинальному напряжению ламп (разница доходит до 17%, что влечет падение силы света на 50%), отсутствие мытья ламп и колпаков и тому подобное несоблюдение элементарных требований светотехники.

Столь ненормальное положение объясняется в значительной степени отсутствием среди широких кругов электротехников сведений о свойствах современных электрических ламп и светильников. В виду того, что при проектировании и эксплуатации электрического освещения эти два вопроса являются основными, мы остановимся на них несколько подробнее.

Выбор ламп.

Здесь следует рассмотреть три пункта: выбор мощности, типа и напряжения лампы.

Расчет освещения по наиболее распространенному методу коэффициента использования:

$$F = \frac{ES}{\eta n},$$

где E — среднее значение требуемой освещенности в люксах, S — площадь пола в кв. метрах, η — коэффициент использования данной осветительной установки, n — число ламп, дает нам величину светового потока лампы F , выраженную в люменах. Зная его, мы можем прямо определить мощность лампы в ваттах или сначала поделить эту величину на $4 \pi = 12,57$, чтобы получить среднюю сферическую силу света в свечах, и уже от них перейти к ваттам. В практике здесь часто встречаются недоразумения, так как пустотные лампы русского производства до сих пор (вопреки нормам)² обозначают по горизонтальной силе света, а не по средней сферической, которая составляет лишь 78—79% от горизонтальной, а газополные лампы, хотя и помечают по фак-

¹ Значения коэффициента использования приведены:

1) Зеленцов.—Световая Техника. Основы применения электрической энергии, Изд. «Кубуч», Л. 1925, стр. 338.

2) Сиротинский.—Основы техники электрического освещения. Госиздат, М.—Л., 1926, стр. 244.

3) AEG. Эл-во как источник света и силы. Изд. Бинт, Берлин, 1923, стр. 149.

² Эл-во, стр. 240—246, № 4, 1923. „Нормы и правила испытания для русских эл. пустотных ламп с угольной и вольфрамовой нитью“.

тически потребляемой ими мощности, но при продаже их пользуются ничем не обоснованным переводом:

40 W — 60 или даже 80 св.

60 W — 100 — 120 св.

75 W — 150 св.

100 W — 200 св.!

и т. д., вводя тем самым в заблуждение широкие слои потребителей. Что касается германских ламп, то здесь получается некоторая неточность опять не в пользу потребителя благодаря тому, что в Германии принимают за единицу силы света свечу Гефнера, которая составляет лишь 0,90 Международной.

В виду этого я позволю себе привести основные данные, характеризующие лампы русского и германского производств, как наиболее распространенные на нашем рынке. В таблице 2-й приведены нормы для пустотных ламп с вольфрамовой нитью русского производства, при чем следует иметь в виду, что если испытания первых партий их, произведенные в 1922 г. в лабораториях московских и ленинградских институтов, дали не вполне удовлетворительные результаты, то последующие испытания, относящиеся к 1923 г., показали, что лампы русских заводов не только удовлетворяют нормам, но в некоторых случаях даже превосходят их.¹

Для газополных ламп русские нормы в настоящее время находятся в стадии разработки, поэтому в таблице 3 (стр. 116) я привожу данные о лампах „Osram“.² Следует заметить, что эти данные в отношении удельного потребления мощности являются отнюдь не преувеличенными, как то показывает сравнение с английскими нормами 1925 года³ и с последними данными (апрель 1925 г.) о лампах „Osram“,⁴ дающими цифры того же порядка. Нормы же для французских газополных ламп⁵ предусматривают удельное потребление мощности на 13⁰/₀ больше.

¹ Тиходеев, П. М. — Современные эл. лампы накаливания. Известия ЭМТ, стр. 78—101, № 4, 1923.

Руссак, И. М. — О качествах русских эл. ламп. Эл-во, стр. 256 — 265. № 5, 1924.

² Otto.—Einrichtung elektrischer Beleuchtungs-Anlagen, стр. 40; те же данные приведены в книге Bloch. Lichttechnik, стр. 555.

³ Plum. Eng. (London), стр. 73, март, 1925.

⁴ Licht und Lampe, стр. 530, № 16, 30/VII — 1925.

⁵ R. G. E., стр. 265—276, № 7, 14/II 1925.

ТАБЛИЦА 2.

Русские нормы для пустотных вольфрамовых ламп.¹

Напряже- ние ламп.	Сила света (горизон- тальная), обозначенная на лампе.	Потребляе- мая мощ- ность.	Ср. сфе- рич. сила света.	Удельное потребление мощности на ср. сф. свечу.	Свето- вой по- ток.	Свето- вая от- дача.
Вольты.	Св.	Вт.	Св.	Вт./св.	Лм.	Лм./вт.
100 — 130	16	20	12	1,65	151	7,55
	25	30	19	1,56	239	7,98
	32	40	26	1,51	327	8,17
	50	60	42	1,42	528	8,80
	100	100	72	1,38	905	9,05
200 — 260	25	30	17	1,72	214	7,13
	32	40	24	1,67	302	7,55
	50	60	40	1,50	502	8,37
	100	100	71	1,40	892	8,92

Примечание 1. Срок службы — 1000 часов.

Примечание 2. Графы второй и двух последних в тексте норм нет, и они получены мною вычислением.

Приведенные данные показывают, насколько ошибочно считать, что газополные лампы потребляют около 0,5 вт./св. и на основании этого называть их „полуваттными“, так как даже при мощности 2000 W они расходуют 0,62 вт./св., а при малых мощностях уд. потребление повышается до 1,5 вт./св.

На диаграмме (фиг. 2) эти данные изображены графически, при чем за величину, характеризующую лампу, взята ее световая отдача в люменах на ватт, а не удельное потребление мощности [вт./св.], что является более правильным в теоретическом отношении и принято Международной Осветительной Комиссией. [Заметим, что удельному потреблению 0,5 вт./св. соответствует световая отдача $\frac{1}{0,5} \times 4\pi \cong 25$ лм./вт.]

¹ Эл-во, стр. 240—246, № 4, 1923.

ТАБЛИЦА 3.

Газополные лампы „Osram“.

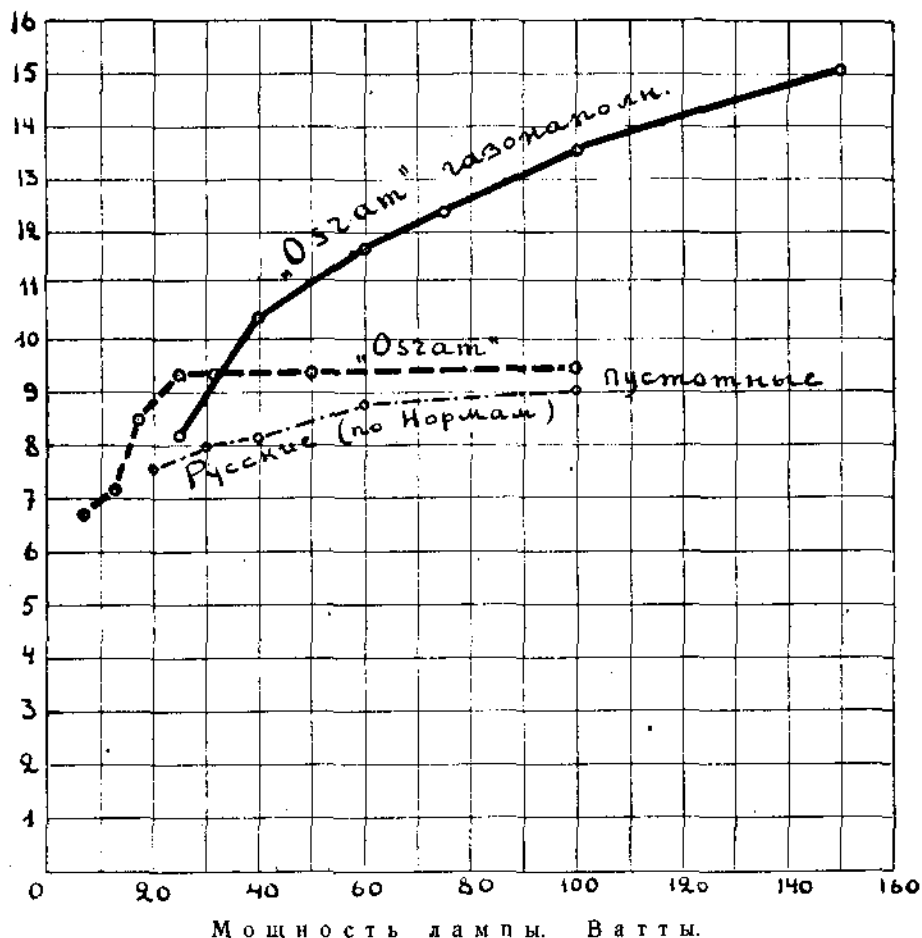
Напряже- ние.	Потребляе- мая мощ- ность.	Средняя сферическая сила света.	Удельное потребление мощности.	Световой поток.	Световая отдача.
Вольты.	Вт.	Св.	Вт./св.	Лм.	Лм./вт.
100 — 130	25	16,2	1,54	204	8,2
	40	33,3	1,20	419	10,4
	60	55,8	1,08	702	11,7
	75	73,8	1,02	928	12,4
	100	108	0,98	1 360	13,6
	150	180	0,83	2 260	15,1
	200	248	0,81	3 110	15,6
	300	405	0,74	5 080	16,9
	500	718	0,70	9 000	18,0
	750	1080	0,69	13 600	18,1
	1000	1490	0,67	18 700	18,6
	1500	2340	0,64	29 400	19,6
2000	3240	0,62	40 700	20,3	
200 — 260	40	26,1	1,53	328	8,2
	60	40,5	1,48	508	8,5
	75	61,2	1,22	768	10,2
	100	90,0	1,11	1 130	11,3
	150	153	0,98	1 920	12,8
	200	225	0,89	2 830	14,1
	300	360	0,83	4 510	15,0
	500	676	0,74	8 480	16,9
	750	1037	0,72	13 000	17,3
	1000	1400	0,71	17 600	17,6
	1500	2160	0,69	27 200	18,1
	2000	3060	0,65	38 500	19,2

Примечание. Срок службы 600 — 800 часов.

Для сравнения приведены данные о германских пустотных лампах „Osram“.¹

При выборе типа и мощности ламп с экономической точки зрения следует принимать во внимание как стоимость электриче-

СВЕТОВАЯ ОТДАЧА. ЛЮМЕННЫ НА 1 ВАТТ.



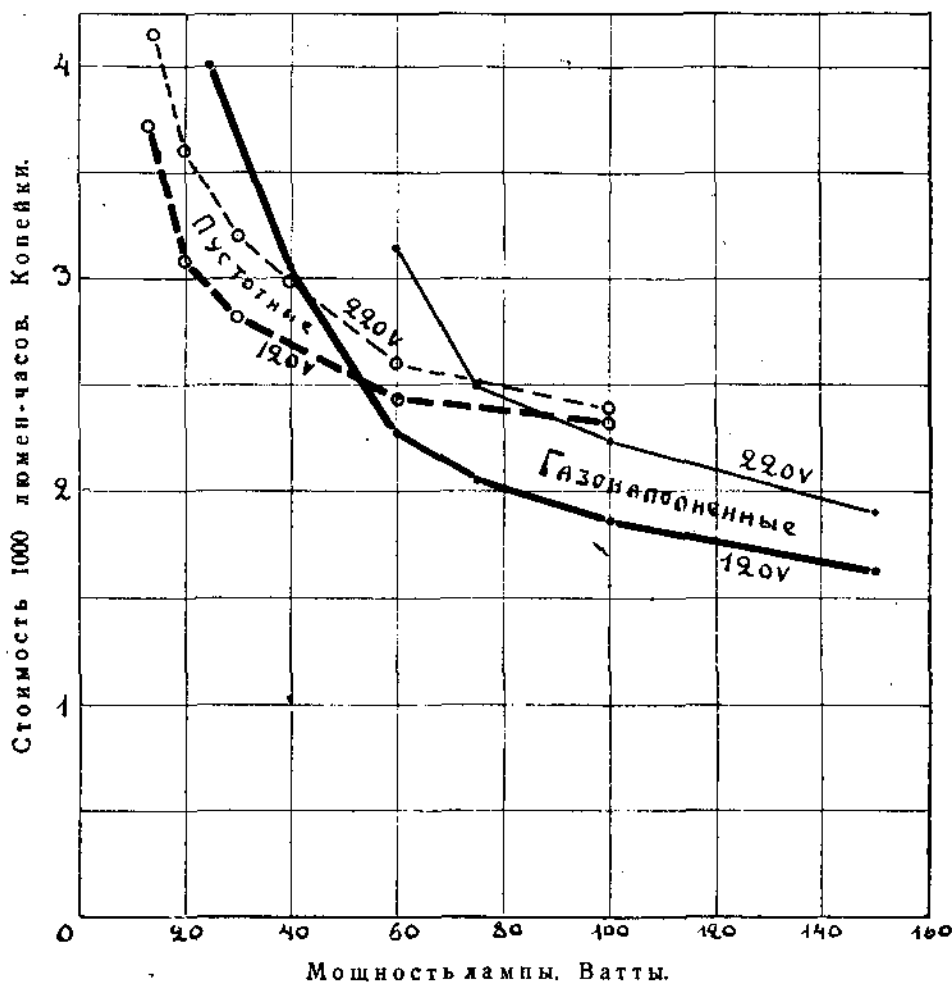
Фиг. 2. Световая отдача электрических ламп накаливания с вольфрамовой нитью для напряжения 100—130 V.

ской энергии, потребляемой лампой, так и стоимость самой лампы. С достаточной для большинства случаев точностью вычисление можно произвести по формуле:

$$x = \frac{A + Pta}{Ft} 1000,$$

¹ Otto. — Einrichtung el. Beleuchtungs-Anlagen, стр. 36.

где x — стоимость 1000 люмен-часов в копейках, A — стоимость лампы в копейках, P — мощность, потребляемая лампой в ваттах, F — средний за все время горения световой поток лампы в люменах, t — срок службы лампы в часах, a — стоимость эл. энергии в копейках за ватт-час.



Фиг. 3. Стоимость световой энергии в случае применения ламп русского производства и при данном соотношении цен на лампы и электроэнергию.

Для примера приведем (фиг. 3) результаты подсчета при следующих данных (для Ленинграда):

Стоимость ламп — по ценам ГЭТ'а на январь 1926 г.

Величину светового потока в начале срока службы для русских пустотных ламп примем по нормам, а для газополных — на 10% меньше, чем для ламп „Osram“.

Уменьшение величины светового потока к концу срока службы возьмем 20%.

Срок службы — 1000 час. для пустотных ламп и 800 час. — для газополных.

Стоимость эл. энергии — 0,018 коп./Wh.

Построив подобную диаграмму для каждого данного случая, мы сможем сделать правильное заключение о том, при какой мощности следует перейти от пустотных ламп к газополным. Так для данного соотношения цен и сроков службы мы видим, что газополные лампы выгодно применять, начиная с 60 W при 120 V и со 100 W при 220 V. Как общее правило, можно сказать, что применение небольшого числа, но более мощных ламп всегда даст меньшую стоимость световой энергии.

Что касается выбора напряжения между 110—120 и 220 V, то, хотя в данном примере мы имеем для 220 V удорожание в среднем на 18%, по сравнению со 120 V, но это еще не может явиться решающим фактором, так как при выяснении вопроса следует принять во внимание потери в сети, стоимость ее и проч., а с другой стороны различие механических и электрических свойств ламп.¹ В большинстве случаев выбор несомненно должен упасть на напряжение 110—120 V, что подтверждается данными американской практики, где потребление ламп составляет:²

110—125 V	94%
220—250 V	6%

Во многих случаях является экономичным эксплуатировать лампы не при номинальном их напряжении, а при том, которое даст наивыгоднейшее соотношение между световой отдачей лампы и сроком службы ее (следует заметить, что, если световая отдача для вольфрамовых ламп изменяется пропорционально 2-й степени напряжения, то срок службы обратно пропорционален 15-й степени). Решение этого вопроса дано в статье инж. А. П. Иванова — О влиянии удельного расхода энергии на стоимость освещения эл. лампами с калильной нитью. Эл-во, стр. 332—339, № 7—8, 1923.

¹ См. статью П. М. Тиходеева — Сравнение эл. ламп накаливания для напряжений 110—125 V и 210—230 V. Эл-во, стр. 145—149, № 3, 1924 г.

² Fowle — Standard Handbook, стр. 1139.

Выбор светильников.

Конечной целью всякой заводской осветительной установки является создание определенной яркости поверхностей, находящихся в поле зрения рабочего, что обуславливает возможность ясного видения. Для получения заданной величины яркости мы должны создать освещенность тем большую, чем меньше коэффициент отражения данной поверхности (т.е. отношение величины отраженного светового потока к величине падающего). Необходимый для этой цели световой поток мы получаем от того или иного источника света, в данном случае — электрической лампы накаливания. Расположив ее над рабочей поверхностью,¹ мы еще не разрешим надлежащим образом поставленной задачи, так как необходимо направить световой поток, испускаемый лампой, в нужном нам направлении и защитить глаз рабочего от блескости. Для этой цели служит арматура лампы, одновременно предохраняющая ее и от механических повреждений, покрытия пылью и т. п. Лампу вместе с ее арматурой и патроном я называю светильником.²

Основными характеристиками светильника являются кривая распределения света и его коэффициент полезного действия, т.е. отношение светового потока, испускаемого светильником к световому потоку лампы. Смотря по тому, предназначаются ли светильники для освещения только рабочих поверхностей или всего помещения в целом, они разделяются на местные и общие. По характеру распределения света принято различать:

1) Светильники прямого света, которые весь световой поток или большую часть его направляют вниз (фиг. 4 и 5 — здесь, как и на следующих рисунках пунктирная кривая относится к лампе без арматуры, а сплошная — к светильнику).

2) Светильники полуотраженного света, направляющие большую часть светового потока вверх (фиг. 6).

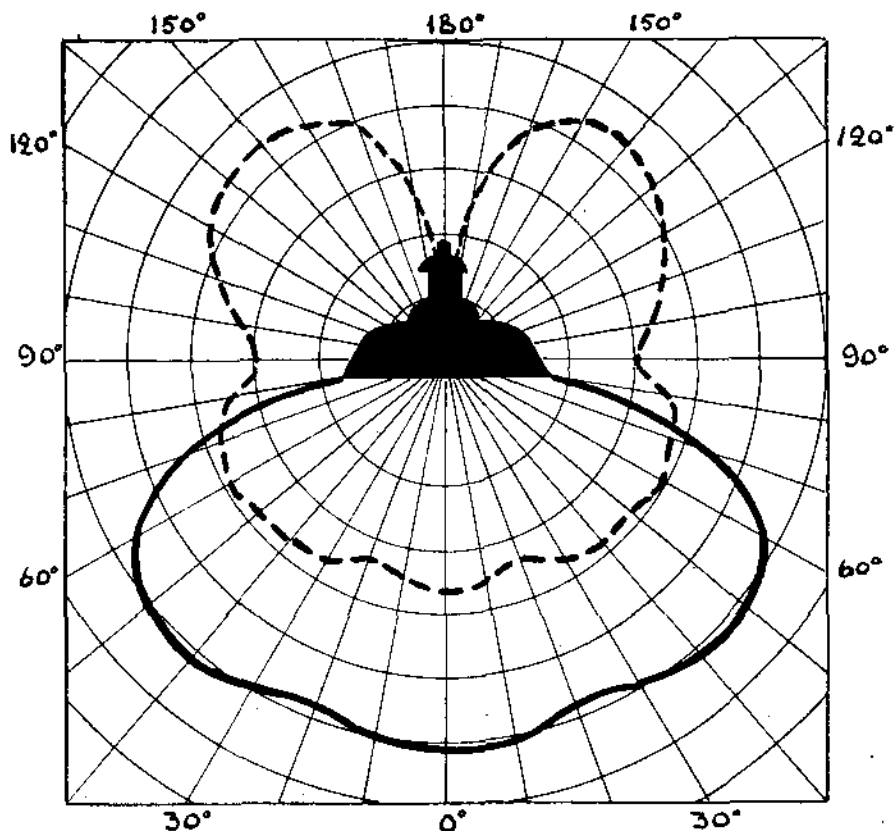
3) Светильники отраженного света, весь световой поток которых направлен вверх (фиг. 7).

Последние две группы применяются только в качестве общих светильников.

¹ Так называется та поверхность, на которую рабочий должен смотреть во время работы.

² Согласно постановлению Комиссии по Осветительной Технике при ЦЭС'е.

Чтобы иметь возможность разрешить правильно вопрос о выборе светильника по его кривой распределения света, необходимо установить, какой вид должна иметь эта кривая для данных условий. Рассмотрим два случая, наиболее часто встречающиеся в практике — местное и общее освещение при системе прямого света.

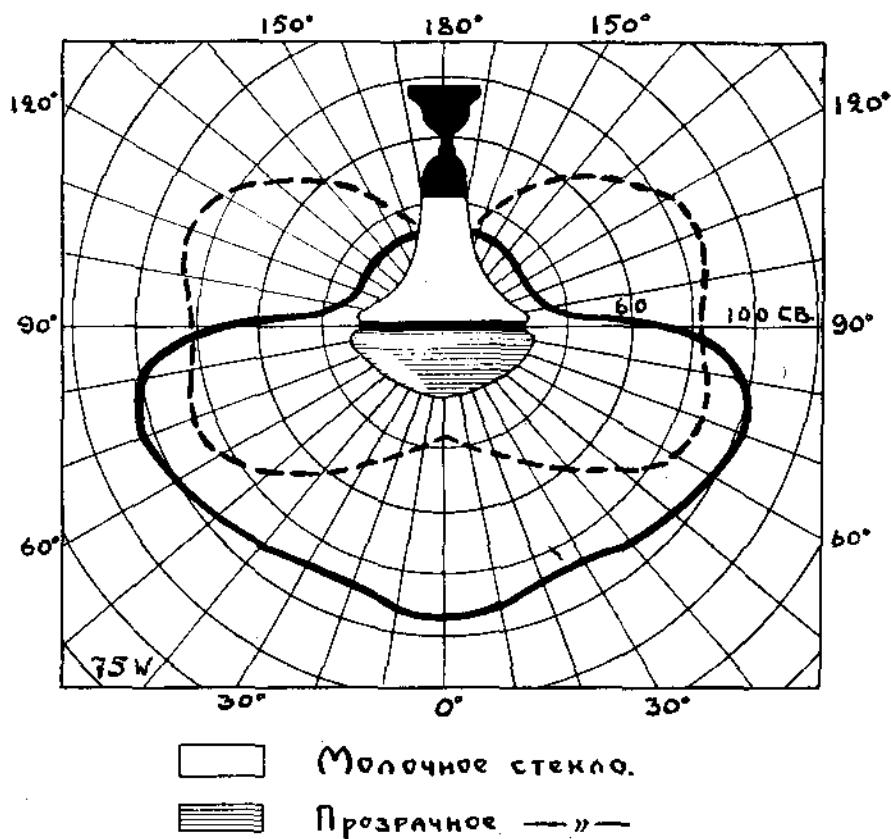


Фиг. 4. Кривая распределения света общего светильника для мастерских с темным потолком.

Несомненно, что глаз находится в наиболее благоприятных условиях, когда рабочая поверхность освещена равномерно. Это требование мы и положим в основу построения идеальной кривой местного светильника. Вычислив силу света J в различных направлениях по элементарной формуле

$$J = \frac{Eh^2}{\cos^2 \alpha}$$

где E — освещенность в люксах $= const.$, h — высота светового центра лампы над освещаемой площадью в метрах, α — угол данного направления с вертикалью, мы определим нижнюю часть кривой, изображенной на фиг. 8.

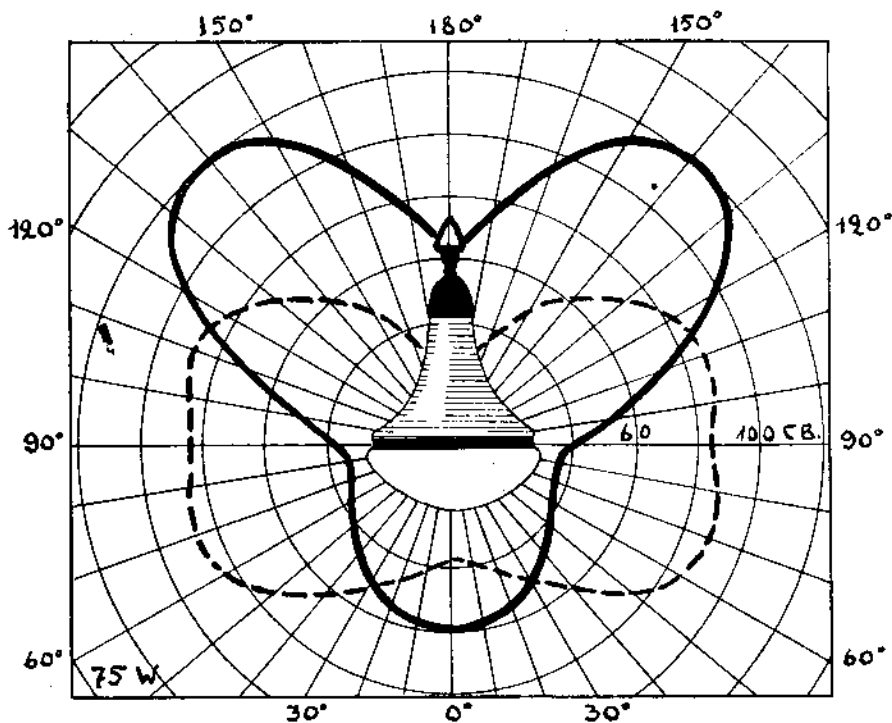


Фиг. 5. Кривая распределения света общего светильника для помещений со светлым потолком.

Обрывая ее под углами 14° , 27° , 37° и 45° , мы получаем кривые, соответствующие отношению диаметра равномерно освещаемого круга к высоте подвеса

$$\frac{d}{h} = 0,5; 1; 1,5 \text{ и } 2.$$

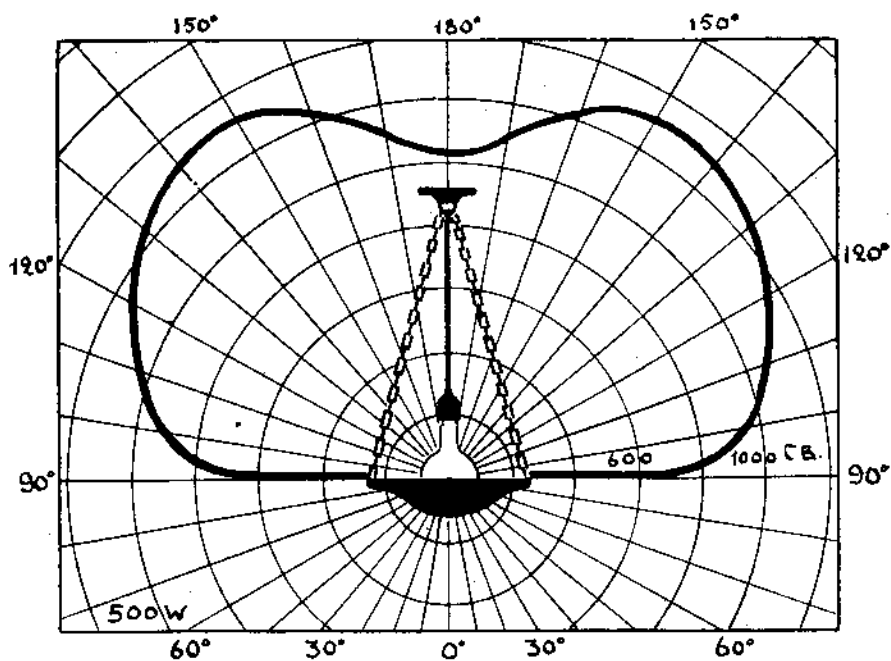
Если мы возьмем для сравнения кривую распределения силы света, глубокого конического эмалированного колпака (см. фиг. 9), то увидим, насколько она не соответствует идеальной кривой, что наглядно подтверждается наличием ясно выраженного пика в кривой освещенности, создаваемой [на горизонтальной плоскости. Вполне удовлетворительно разрешают поставленную задачу стеклянная призматическая арматура типа Голофан,¹ но в виду круп-



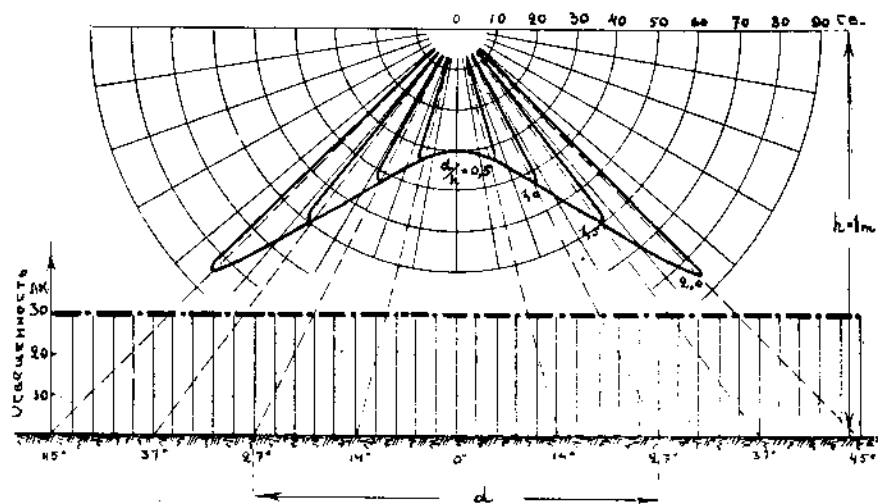
Фиг. 6. Кривая распределения света общего светильника полуотраженного света.

кости и быстрой загрязняемости она редко находит применение в заводском освещении. Металлические колпаки, дающие равномерную освещенность, в настоящее время широко применяются на Западе, у нас же в СССР производство их впервые было начато на заводе „Электрик“ ГЭТ'а в Ленинграде. Испытания ряда изготовленных образцов, произведенные М. Е. Зеленцовым в фотоме-

¹ Описание и кривые см. Зеленцов — Световая техника, стр. 307 — 311. Сиротинский — Основы техники эл. освещ., стр. 173—176.

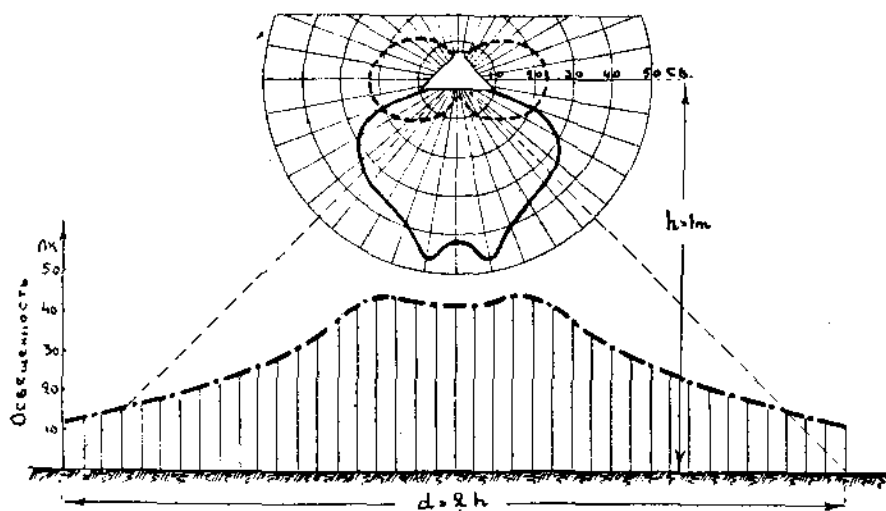


Фиг. 7. Распределение света общего светильника отраженного света.

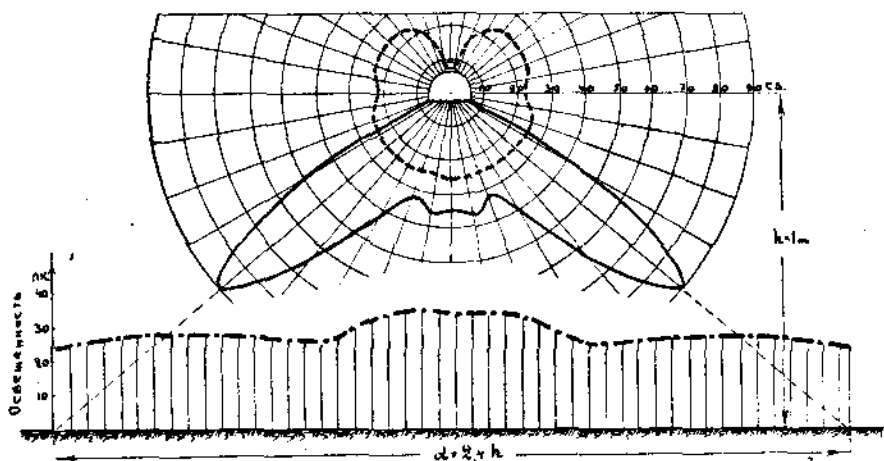


Фиг. 8. Идеальные кривые местных светильников при отношении

$$\frac{d}{h} = 0,5; 1; 1,5 \text{ и } 2.$$



Фиг. 9. Кривая освещенности, создаваемая пустотной лампой с глубоким коническим колпаком.¹



Фиг. 10. Кривая освещенности, создаваемая газополной лампой с колпаком параболического типа.

¹ Кривая распределения силы света — см. Андреевский А. И. — О влиянии абажуров, колпаков и рефлекторов на распределение света ламп накаливания. Эл-во, стр. 229—233, № 13—14, 1916.

Кривая освещенности получена вычислением.

трической лаборатории Эл.-Технического Института (по заданию Л.О.ГЭТ'а) и мною на заводе „Севкабель“ и в фотометрической лаборатории ЛПИ, дали в некоторых случаях удовлетворительные результаты, как напр., кривые,¹ приведенные на фиг. 10, относящиеся к никкелированному и полированному образцу из латуни.

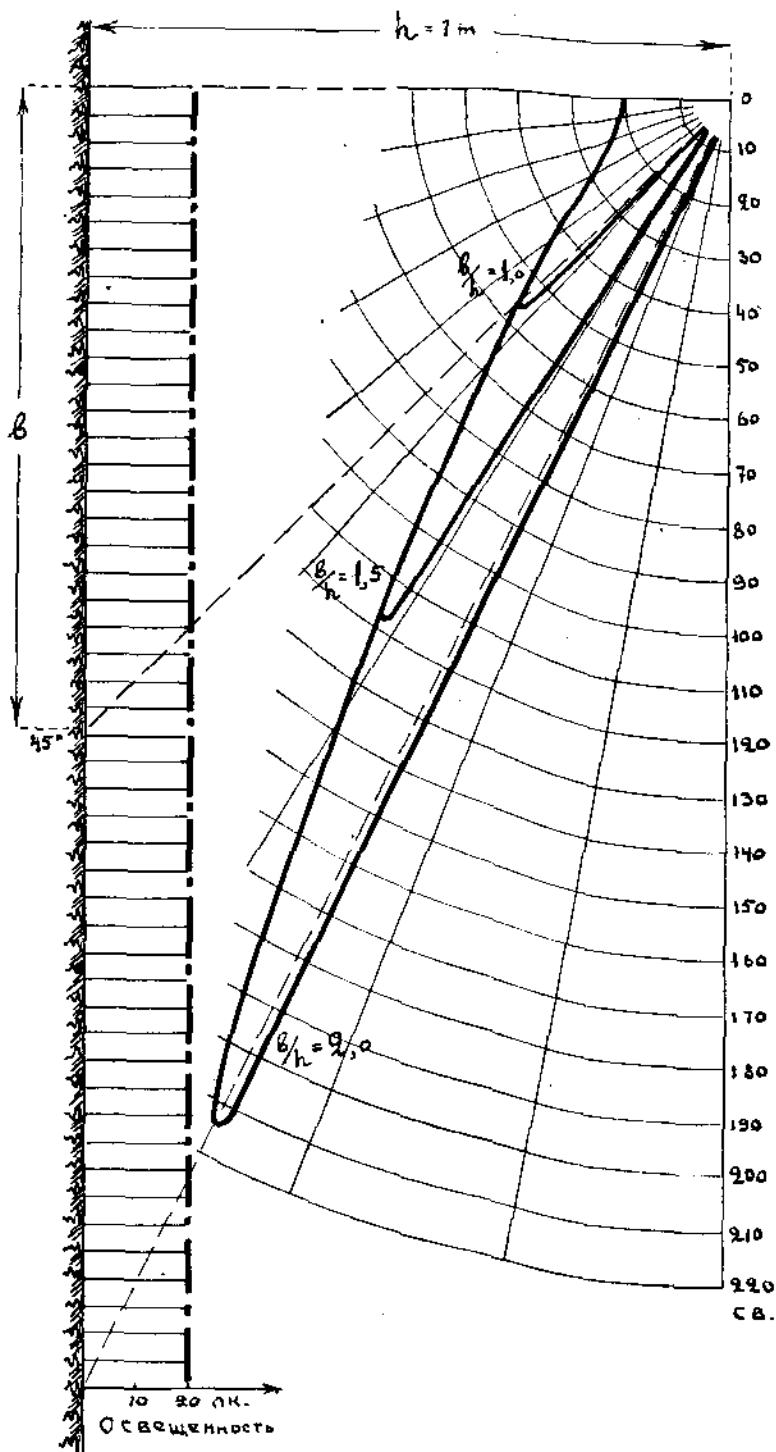
Иногда светильник приходится располагать не над серединой освещаемой поверхности, а сбоку ее. Такие случаи мы имеем при освещении вертикальных поверхностей некоторых станков, плоских витрин, потолка или пола, когда в силу местных условий светильник нельзя поместить посредине помещения, наконец, при декоративном освещении фасадов зданий. При этом является целесообразным отказаться от формы светильника — как тела вращения и избрать несимметричную форму — цилиндрическую (в форме софита) или чашеобразную. Идеальную кривую такого рода „косо-света“ мы получим по тому же методу, что и выше, задавшись равномерной освещенностью поверхности, при чем отношение протяжения ее „ b “ к расстоянию до источника света „ h “ в этом случае может достигать значительных размеров (см. фиг. 11).

Если при построении идеальных кривых для местных светильников мы исходили из случая освещения данной поверхности одним источником света, то при общем освещении по системе прямого света мы можем задаться требованием равномерного освещения поверхности, находящейся на $1\ m$ над уровнем пола, четырьмя источниками света, расположенными по краям ее² и произвести расчет по той же формуле. Следует иметь в виду, что при этом мы не принимаем во внимание отражения светового потока от стен и поэтому результаты, приведенные на фиг. 12 и 13, могут быть полностью применены лишь к освещению очень больших мастерских или при темных стенах, а также при выборе светильников для наружного освещения. Приведенные мною кривые представляют из себя лишь один из возможных вариантов решения поставленной задачи, так как мы можем задаваться различными формами для кривых освещенности A и B (фиг. 13), подчиняя их условию, чтобы сумма ординат была постоянной.

¹ Кривая распределения силы света получена при фотометрировании в лаборатории ЭТИ.

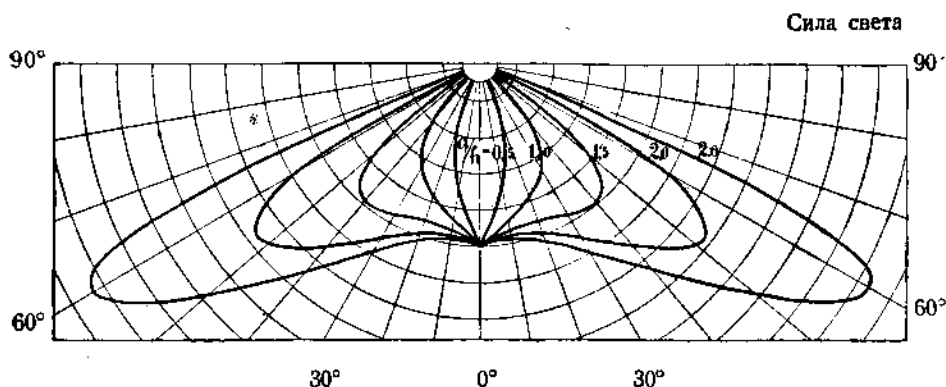
Кривая освещенности — по вычислению.

²) P e n d e r — Handbook for Electrical Engineers. New-York, 1922, стр. 811.

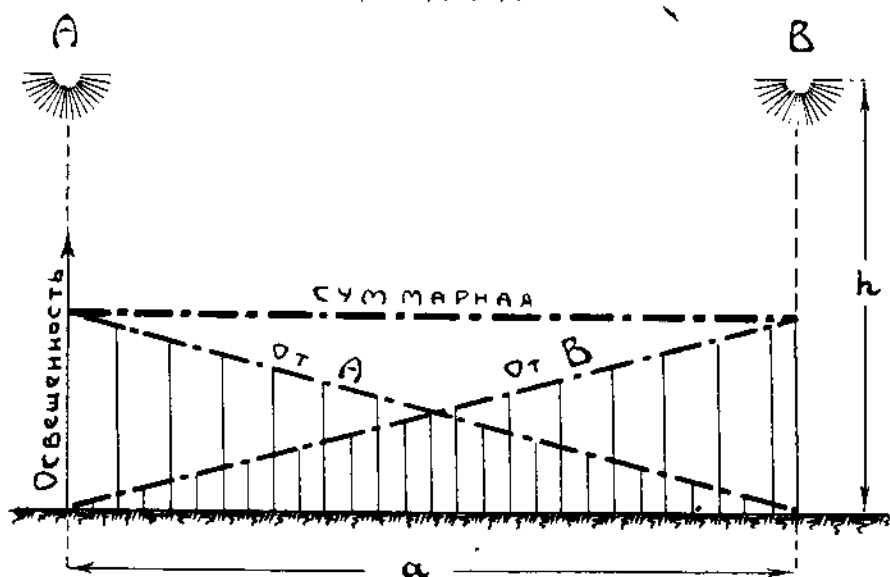


Фиг. 11. Идеальные кривые для кососвета при отношении $b/h = 1,0; 1,5; 2,0$.

Подобного рода арматура для системы прямого света разрабатывается в настоящее время ГЭТ'ом как по заграничным образцам, так и по оригинальным чертежам, составленным П. М. Тиходеевым. Производство некоторых типов, давших при испытании удовлетворительные результаты, начато уже в массовом масштабе. На фиг. 4 (см. выше) приведена кривая распределения силы света



Фиг. 12. Одна из возможных форм кривых распределения света для получения равном. горизонт. освещенности от неск. источн. света при отношении $a/h = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$.



Фиг. 13. Кривые освещенности, создаваемой источниками света для получения равномерной гориз. освещенности между ними.

образца по типу американского стандартного светильника „RLM Dome“,¹ изготовленного из железа и покрытого белой эмалевой краской. В настоящее время ГЭТ организовал эмалирование изготавливаемой им арматуры, что несомненно несколько повысит ее коэффициент полезного действия по сравнению с испытанными образцами. (Для образца, изображенного на рис. 4, к. п. д. равен 61%)

Наиболее распространенным недостатком применяющихся в настоящее время общих светильников является блескость, обусловливаемая возможностью видеть нить накала под углом в 60° и даже 30° с горизонталью. Применение матовых ламп, яркость которых в среднем в 10 раз меньше яркости нити, дает удовлетворительный результат лишь при маломощных лампах.² Кроме того они быстро загрязняются, что влечет резкое понижение силы света. Значительно лучшими в этом отношении являются предложенные в Америке лампы, матированные изнутри, производство которых организуется на заводе „Светлана“.

Хороший результат дает применение ламп с колбой из молочного стекла (см. табл. 1), но опять лишь для ламп малой мощности.

Что касается уменьшения светового потока по сравнению с лампой из прозрачного стекла, то оно составляет:

Для ламп, матированных изнутри	1 — 2% ³
„ „ с матированной нижней половиной колбы (снаружи)	5 — 6%
Для ламп сплошь матированных (снаружи)	8 — 10% ⁴
„ американских ламп с колбой из молочного стекла	14% ⁴
„ ламп „Argenta“ Philips	~ 14% ⁵

Наилучшим решением является применение рассеивателей из молочного стекла (шаровидной или какой-либо специальной формы), предохраняющих одновременно лампу от осаждения на нее пыли и копоти. Такие стекла поглощают от 10 (светлый опал) до 30 (густое молочное стекло) процентов света.

¹ Кривая получена при испытании образца в фотометрической лаборатории ЭТИ.

² „Нормы освещенности пром. предприятий“, изд. Вопросы Труда, М. 1925, стр. 16 — 31.

³ Interesting Aspects of the Inside Frost Lamp. J. A. I. E. E., стр. 77 — 78, янв. 1926.

⁴ L u c k i e s h. Tentative Code of Illuminaire Design. Transactions of the Illuminating Engineering Society (New-York), стр. 703 — 742, декабрь 1922.

⁵ По измерениям проф. М. М. Богословского в январе 1926 г.

На арматурном заводе ГЭТ'а в Москве в настоящее время заканчиваются работы по выработке типов и организации производства рациональных светильников для общего и местного освещения.

Таким образом, можно надеяться, что в области производства электрических ламп и арматуры для них мы догоним Запад и создадим благоприятные условия для скорейшего осуществления рационального освещения наших фабрик и заводов.

В заключение считаю долгом выразить благодарность инж. П. М. Тиходееву за содействие в производстве испытаний и ряд ценных указаний при разработке данного вопроса.

О ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММАХ В ТРЕХФАЗНОМ ТОКЕ.

Инж. Г. Третьяк.

I. Понятие о векторных диаграммах.

Умение оперировать с векторными диаграммами в многофазных токах имеет большое значение для электротехников, имеющих дело с трехфазным током, т. к. оно позволяет просто и отчетливо решать различные задачи практики.

Между тем относительно векторных диаграмм у нас в классической теоретической литературе (я имею в виду печатные курсы ВТУЗ) есть некоторая недоговоренность, иногда вызывающая разнобой в применении диаграмм у практиков, а иногда и у авторов инженерных курсов.

В виду вышензложенного автор намерен дать, как ему представляется, общепринятую теорию векторных диаграмм и применить ее для некоторых практически важных случаев.

1) Представление синусоидальных величин векторами в однофазном токе.

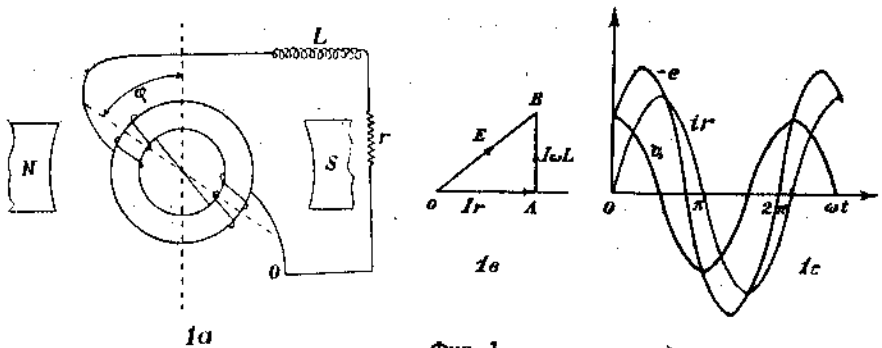
Синусоидальную величину графически можно изобразить в прямоугольных координатах, отложив по оси абсцисс время t (или пропорциональную ему величину $\omega t = 2\pi ft$), а по оси ординат мгновенные значения синусоидальной величины.

Получается таким образом график мгновенных значений синусоидальной величины, дающий весьма наглядное представление о синусоидальной величине.

Также синусоидальную величину можно изобразить вектором, если длину этого вектора взять равной амплитуде (или $\frac{\text{амплитуда}}{\sqrt{2}}$) и условиться, что этот вектор вращается с угловой скоростью $2\pi f = \omega$ против часовой стрелки (как принято в последнее время). При таком изображении мгновенное значение получается как проекция вращающегося вектора на какую-либо неподвижную

ось. Вектор на диаграмме изображается в его начальном положении. Начальное положение вектора определяется его положением по отношению к неподвижной оси.

На фиг. 1 *a*, *b* и *c* приведены: (а) схема цепи переменного тока, состоящей из ваттного сопротивления r и самоиндукции L (сопротивлением и самоиндукцией обмотки генератора мы пренебрегаем); 1 *b* векторная диаграмма (Δ напряжений) для этой цепи и 1 *c* графики мгновенных значений. (Масштабы напряжений на диаграмме (фиг. 1 *b*) 1 $cm = n$ вольт, на графиках мгновенных значений (фиг. 1 *c*) 1 $cm = n\sqrt{2}$ вольт. Векторная диаграмма



Фиг. 1.

дает все то, что дают графики мгновенных значений, а именно: величины амплитуд (или $\frac{\text{амплитуд}}{\sqrt{2}}$, т.е. величины действующих значений) и их последовательность во времени, т.е. фазные углы.

Преимущества изображения синусоидальных величин векторами заключаются в том, что все громоздкие операции с синусоидальными величинами заменяются простыми и наглядными операциями с векторами. Будем считать это общеизвестным.

Начальный момент, или положение неподвижной оси, на которую следует проектировать вращающиеся вектора диаграммы (фиг. 1) для получения мгновенных значений, соответственно координат для фиг. 1 *c* произвольно, так как и аналитически мы пишем:

$$\left. \begin{aligned} ir &= ir \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_0) \\ v_L &= I\omega L \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_0) \\ e &= E \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi + \varphi_0) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

где $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{r}$, а φ_0 — произвольный угол.

Фиксируя угол φ_0 , мы тем самым фиксируем и начало координат для фиг. 1 *с*, или положение неподвижной оси на диаграмме фиг. 1 *б*.

Неподвижная ось обычно на диаграммах не изображается, так как вопрос о начале отсчета времени или фиксированном начальном положении векторов на диаграмме возникает обычно только тогда, когда данную диаграмму сравнивают с другой, напр., при параллельной работе генераторов или трансформаторов.

Весьма часто неподвижную ось представляют направленной вертикально вверх, тогда вектор, у которого начальная фаза равна нулю (напр. при $\varphi_0 = 0$ вектор $I r$), совпадает с горизонтальной осью и располагается вправо от неподвижной оси, а положение других векторов определяется их фазными углами (отсчет углов против часовой стрелки).

На фиг. 1 начало отсчета времени, соответственно начало координат для фиг. 1 *с* и начальное положение векторов на диаграмме 1 *б*, при направлении неподвижной оси вертикально вверх, отвечают изображенному положению обмотки генератора.

2) Направление стрелок на векторах. Обычно вектора мы снабжаем стрелками. Это придает больше наглядности векторным диаграммам. Необходимо однако иметь в виду, что направление стрелок можно изменить на обратное, не меняя момента начала отсчета времени (при фиксированном начале отсчета времени и фиксированной неподвижной оси фиксируется положение векторов). Действительно, направление стрелок, принятое на фиг. 1, указывает, что при переходе к графикам мгновенных значений мы рассматриваем изменения потенциала точки *B* по отношению к потенциалу точки *O*, изменение потенциала точки *B* по отношению к потенциалу точки *A* и т. д. Эти изменения представляют графики e , v_b и т. д. При этом мы принимаем постоянным потенциал той точки, относительно которой рассматриваем потенциалы других точек.

Напр., на фиг. 1 *с* мы принимаем постоянным потенциал точки *O* для графиков e и $i r$, а также принимаем постоянным потенциал *A* для графика v_b .

Меняя стрелки на обратные, мы должны будем рассматривать на графике для e изменение потенциала точки *O* по отношению к потенциалу точки *B*, при чем уже потенциал точки *B* будем считать постоянной величиной и т. д. При этом графики мгновенных значений повернутся на 180° , т. к. знак у мгновенных значений переменится на обратный.

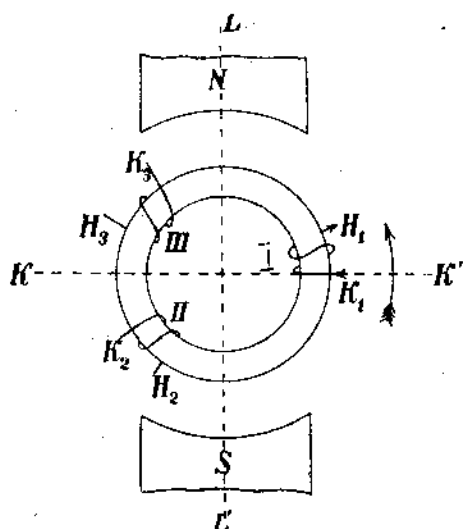
Но векторная диаграмма при фиксированном положении неподвижной оси (напр. вертикальном, снизу вверх) будет отвечать тому же моменту начала отсчета времени или, более конкретно, тому же положению обмотки генератора в момент начала отсчета времени, что и векторная диаграмма, имеющая обратное направление стрелок.

Таким образом направление стрелок на векторах условно. Некоторые авторы по этому избегают пользоваться стрелками. Преимущества отсутствия стрелок на векторах переменного тока те, что при этом отсутствует повод к тем недоразумениям, которые иногда имеют место, когда забывают о том, что стрелки имеют чисто условное значение.

Нам представляется все же целесообразным для наглядности стрелками пользоваться и только помнить, что по сути дела мы их можем брать в ту или другую сторону.

II. Основные свойства векторных диаграмм в трехфазном токе.

Исходя из условия изображения синусоидальных величин векторами, мы должны прийти к заключению, что векторные диаграммы в многофазных токах должны давать величину амплитуд



Фиг. 2.

фаз) указан стрелкой.

Фазы по порядку их следования обозначены I, II и III.

эл. сил, фаз (или $\frac{\text{амплитуда}}{\sqrt{2}}$) и их взаимное расположение, т.-е. фазные углы, или последовательность фаз. Таким образом величина амплитуд (или действующих значений) и последовательность фаз являются основными элементами диаграммы. Знание их необходимо для построения диаграммы.

Рассмотрим диаграмму для схематического трехфазного альтернатора, изображенную на фиг. 2.

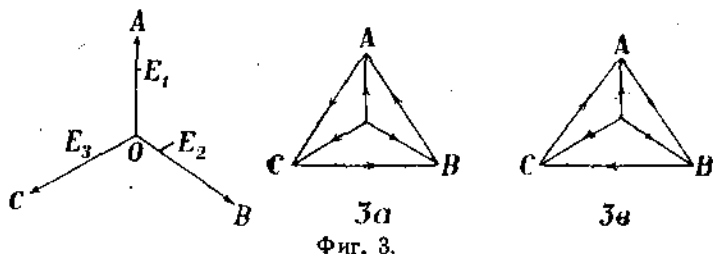
Направление вращения обмоток (порядок следования

Так как фазы (обмотки) совершенно одинаковы, то каждую фазу можно принять за первую, и их нумерация указывает только их последовательность. Обозначая фазы в порядке их следования *A, B* и *C*, мы при данном вращении генератора будем иметь три комбинации *a, б* и *с* для нумерации фаз, приведенные в табл. 1.

Нумерация фаз.	I.	II.	III.
а) Комбинация	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
б) Комбинация	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>
с) Комбинация	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>

Начала и концы обмоток.

Относительно того, что называть началом и концом обмотки, можно ввести определенное условие. Мы примем начала и концы фазных обмоток так, как обозначено на черт. 2. При этом отметим, что электродвижущая сила в каждой из обмоток в течение одного полпериода направлена от конца к началу, а в течение второго полпериода от начала к концу.



Аналитическое выражение для электродвижущих сил фаз трехфазного генератора при симметричном расположении фаз будет

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= E_m \operatorname{Sn}(\omega t + \varphi) \\ e_2 &= E_m \operatorname{Sn}\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_3 &= E_m \operatorname{Sn}\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

где φ — угол, зависящий от момента начала отсчета времени.

Векторная диаграмма эл. сил фаз трехфазного генератора, соответствующая уравнению (2), приведена на фиг. 3.

Фиксируя угол φ в выражении (2), мы тем самым фиксируем положение фазных обмоток в момент начала отсчета времени,

а также фиксируем на диаграмме положение той неподвижной оси, на которую мы проектируем вектора для получения мгновенных значений.

Приведенная диаграмма, фиг. 3, представляющая систему уравнений (2), иногда применяется без указания на то, соединены электрически между собою обмотки, в которых существуют эл. силы, или нет, и если соединены, то как. Необходимо однако иметь в виду, что для ясности следует избегать такой трактовки векторной диаграммы в многофазных токах по следующей причине: представляя три вектора, связанных в точке O , мы тем самым допускаем, что точка O имеет какое-то значение.

Это значение как будто не может быть иным, как только тем, что три обмотки связаны электрически в одной точке, которую мы называем O . Если этого нет, то вектора, изображающие эл. силы, заданы только по направлению и величине и нельзя говорить об определенной общей для них точке.¹

Поэтому в дальнейшем будем так соединять вектора, как соединены электрически обмотки (звездой, если обмотки соединены звездой, треугольником, если обмотки соединены треугольником, и т. д.).

Такое изображение векторных диаграмм иногда называют топографическим методом. Это название указывает на следующее свойство векторных диаграмм.

Так как электродвижущие силы или разности потенциалов представляются на диаграмме расстояниями между точками плоскости, то расстояние между любыми точками плоскости диаграммы представляет разность потенциалов, или, другими словами, всякая точка плоскости диаграммы имеет определенный потенциал по отношению к определенной точке плоскости, потенциал которой мы примем за нуль или постоянную величину. Например, на диаграмме фиг. 3, представляющей векторную диаграмму для случая соединения генератора Δ , имеем, что точки A , B и C представляют определенные потенциалы, если точку O , в которой соединены начала или концы обмоток, положить равной нулю. Далее расстояния AB , BC и CA представляют линейные напряжения.

¹ В однофазном токе величина и направление векторов вполне представляют картину их взаимоотношения в цепи, т. е. цепь проста. Поэтому вектора могут и не быть так соединены, как соединены соответствующие части цепи.

Направление линейных напряжений можно взять или по часовой стрелке или против часовой стрелки, как показано на фиг. 3а и 3в.

Фиг. 3а соответствует соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{VA} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B \\ \dot{E}_{VB} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C \\ \dot{E}_{VC} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A \end{aligned} \right\} \text{или} \left\{ \begin{aligned} e_{VA} &= e_A - e_B \\ e_{VB} &= e_B - e_C \dots \dots \dots (3) \\ e_{VC} &= e_C - e_A \end{aligned} \right.$$

Фиг. 3в соответствует соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{AB} &= \dot{E}_B - \dot{E}_A \\ \dot{E}_{BC} &= \dot{E}_C - \dot{E}_B \\ \dot{E}_{CA} &= \dot{E}_A - \dot{E}_C \end{aligned} \right\} \text{или} \left\{ \begin{aligned} e_{AB} &= e_B - e_A \\ e_{BC} &= e_C - e_B \dots \dots \dots (4) \\ e_{CA} &= e_A - e_C \end{aligned} \right.$$

В соотношения (2), (3) и (4) и соответствующих диаграммах мы направляли стрелки, пользуясь круговой подстановкой. Однако, так как направление стрелок условно, то иногда удобнее круговой подстановки и не соблюдать, как будет это показано несколько ниже. В настоящее же время построим диаграммы для различных соединений генератора, изображенного на фиг. 2.

III. Векторные диаграммы фиг. 4а, 5а, 6а и 7а отнесены к началу отсчета времени, при котором эл. сила в первой фазе имеет направление от конца обмотки к началу. Фиг. 4а и 5а относятся к случаю соединения обмоток звездой, фиг. 6а и 7а к случаю соединения обмоток треугольником.

Если мы положение неподвижной оси, на которую должны проектироваться вектора, примем за вертикальное (перпендикулярное к вектору эл. силы в первой фазе) и направим эту ось снизу вверх, то диаграммы фиг. 4а, 5а, 6а и 7а будут соответствовать случаю для $\varphi = 0$ в уравнения (2), и положение обмоток для начала момента отсчета времени будет соответствовать примерно изображенному на фиг. 2.

Если построим те же диаграммы, но для начала отсчета времени, когда направление эл. силы в первой фазе будет от начала к концу, то получим для возможных соединений обмоток диаграммы фиг. 4б, 5б, 6б и 7б.

Считая положение неподвижной оси фиксированным для диаграмм фиг. 4—7 с индексами а и б, мы видим, что диаграммы с индексом б повернуты на π или 180° , вследствие того, что отсчет времени для них принят позже на время $\frac{T}{2}$.

На диаграмме фиг. 5а мы направление векторов взяли от начала к концу, хотя для первой фазы направление эл. силы в момент отсчета времени от конца к началу.

Такое направление стрелок представляется необходимым, т. к. удобнее рассматривать потенциалы концов лучей звезды по отношению к их общей нейтральной точке, а не наоборот, как для диаграммы, так и для графиков мгновенных значений. Положение же векторов для данного момента начала отсчета времени и фиксированной неподвижной оси, как мы видели ранее, от изменения направления стрелок не меняется.

Сказанное о диаграмме фиг. 5а относится к диаграмме 4b. Что касается диаграмм для соединения Δ , то направление стрелок на них можно изменить на обратное. От этого ничего не изменится.

Также ничего не изменилось бы, если бы мы стрелки ставили, не пользуясь круговой подстановкой. Действительно, угол между соседними векторами у нас получается в 120° , как результат того, что мы для каждой фазы рассматриваем потенциал начала по отношению к потенциалу конца, или наоборот. Но может оказаться удобнее рассматривать для одной фазы потенциал начала по отношению к потенциалу ее конца, а для другой наоборот. Тогда угол между фазами будет 60° .

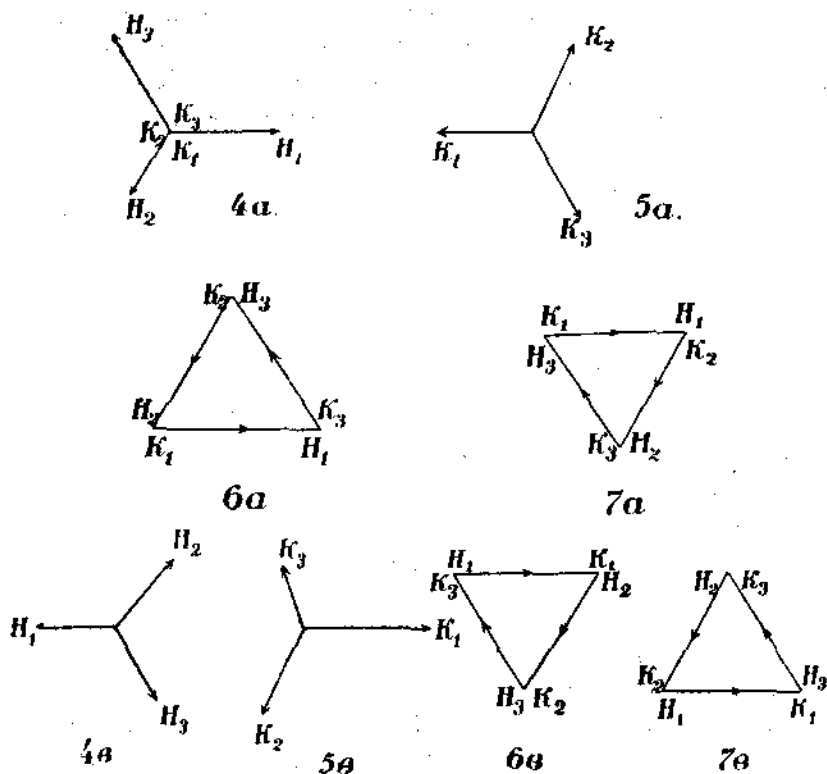
Приведенные диаграммы фиг. 4—7 а и б исчерпывают все возможные случаи соединений обмоток генератора в Δ и Λ при разных моментах начала отсчета времени.

Если бы навивка обмоток генератора была не против часовой стрелки, как указано на генераторе фиг. 2, а наоборот, то началу отсчета времени, соответствующему положению первой фазы в генераторе выше горизонтальной оси KK' (см. фиг. 2), соответствовали бы диаграммы с индексом „b“, а началу отсчета времени, соответствующему положению 1-й обмотки ниже оси (см. фиг. 2), соответствовали бы диаграммы фигур с индексом а. Из рассмотрения приведенных выше диаграмм вытекает, что для генератора, при любом соединении его концов в звезду или треугольник, мы можем брать любую из диаграмм фиг. 4 и 5а и б для звезды и 6 и 7а и б для треугольника.

В самом деле, звезда диаграммы фиг. 4а изменяется вследствие пересоединения концов в фиг. 5а, именно она повертывается на 180° , но при изменении начала отсчета времени на 180° , диаграмма фиг. 5а переходит в диаграмму фиг. 5b совершенно идентичную с 4а.

При этом однопотенциальными являются точки, изображающие на одной диаграмме начала обмоток, на другой—концы. (Разницы в электрическом отношении между концами и началами обмоток, как мы видели, нет никакой.)

Но раз для всякого трехфазного генератора может быть применена любая диаграмма соответственно случаю звезды или тре-



Фиг 4—7.

угольника, то вообще генераторы, имеющие равные фазные эл. силы и частоту и одноименное соединение, могут работать параллельно, так же как и генераторы, имеющие одинаковое линейное напряжение, но разноименное соединение (один Δ а, другой \wedge).

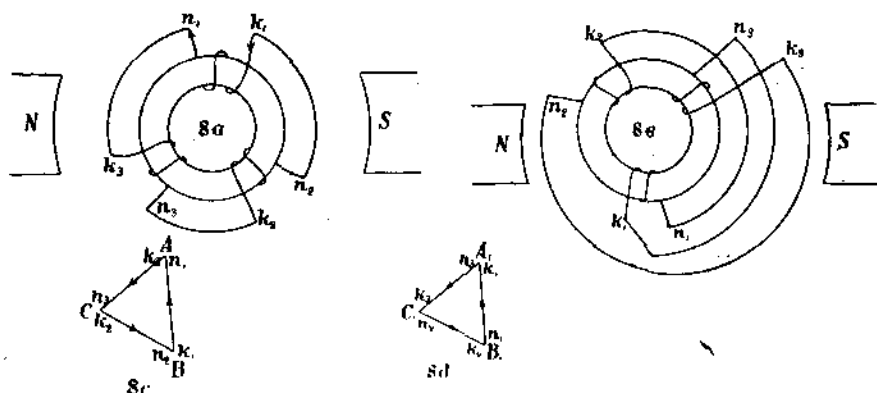
Последнее обстоятельство вполне известно и здесь приводится для иллюстрации.

Напр., два генератора, соединенные Δ , но у одного соединение обмоток сделано так, как показано на фиг. 8а, а у другого так, как показано на фиг. 8б.

При одинаковом одновременном расположении обмоток генераторов мы бы имели для одного генератора диаграмму 6 а (или 6 б), а для другого 7 а (или 7 б).

Но если одноименные обмотки смещены на 180° , как показано на фиг. 8 а и 8 в, то тогда векторные диаграммы для обоих генераторов будут одинаковы, как указано на фигуре 8 с и 8 д.

Т. к. действительно, если соединить электрически накоротко сходственные вершины диаграмм 8 с и 8 д, напр., вершины, обозначенные буквами С и C_1 , то обе диаграммы совместятся, т.-е. точки А и A_1 , точки В и B_1 совпадут, или, другими словами, потенциалы



Фиг. 8.

этих концов будут одинаковы все время (изменяясь во времени по синусоидальному закону), что является необходимым условием параллельного соединения.

Для дальнейшей иллюстрации применения векторных диаграмм рассмотрим включение трансформаторов на параллельную работу, а затем рассмотрим особые случаи векторных диаграмм и опытное определение порядка следования фаз.

III. Параллельное включение трансформаторов.

Для параллельной работы трансформаторы должны кроме одинакового коэффициента трансформации и определенного соотношения реактивностей иметь одинаковые векторные диаграммы, т.-е. такие, которые совмещаются.

В настоящее время, согласно определенных норм, трансформаторы снабжаются обозначением концов обмоток и указанием,

к какой из групп соединений они принадлежат. Для примера приводим таблицу обозначений и диаграмм, принятых Американским Институтом инж.-электр.

	А		В	
Группа I. Угловое смещение 0°				
Группа II. Угловое смещение 180°				
Группа III. Угловое смещение 30°				
Группа IV. Угловое смещение 30°				

Если имеются указанные в приведенной таблице обозначения, то после проверки вольтметром действительности совпадения диаграмм трансформаторы одной группы могут быть включены параллельно.

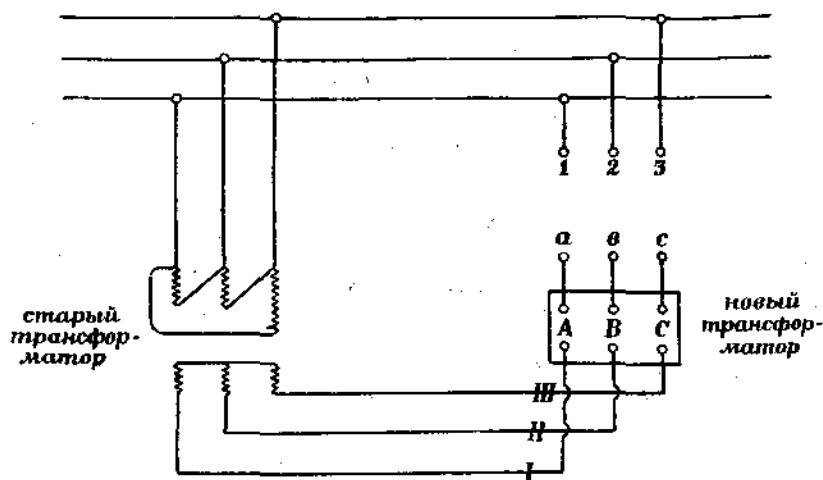
Рассмотрим способ включения в параллельную работу трансформаторов, не имеющих приведенных выше указаний.

Допустим, что требуется включить к работающему трансформатору $\Delta \nabla$ другой параллельно, на низкой стороне, согласно прилагаемой схеме (см. фиг. 9).

Строим векторную диаграмму низкого напряжения работающего трансформатора, фиг. 10 (ее можно строить, не зная порядка следования фаз, так как последующие операции не зависят от того, взята ли действительная векторная диаграмма, или ее зеркальное изображение).

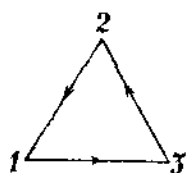
Для того, чтобы найти векторную диаграмму низковольтной стороны нового трансформатора и сравнить ее с диаграммой фиг. 10, необходимо соединить коротко один из зажимов 1, 2, 3

с одним из зажимов a, b, c . При таком соединении точки a, b и c разместятся в плоскости диаграммы, в которой размещены 1, 2 и 3, и расстояния между точками 1, 2, 3 и a, b, c будут представлять напряжения, измеренные вольтметром между соответствующими точками.



Фиг. 9.

Например, соединив точки 3 и C , мы для определения положения точки „ b “ измеряем вольтметром напряжение V_{3b} и V_{2b} (соответственно между зажимами 3 и b и между зажимами 2 и b) и точку „ b “ определяем как пересечение окружностей радиуса V_{3b} и V_{2b} , проверенных соответственно из центра 3 и 2.



Фиг. 10.

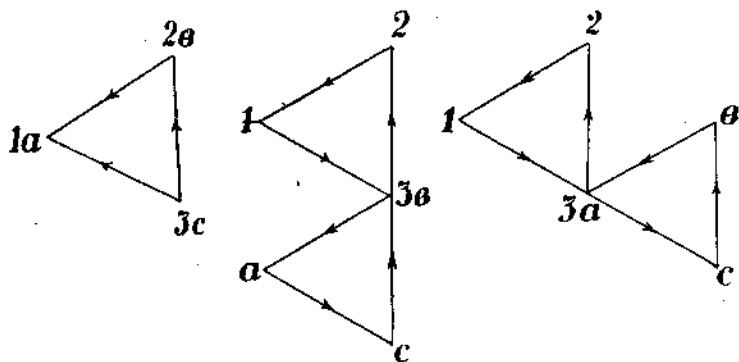
Для нахождения положения точки „ a “ измеряем напряжение V_{1a} и V_{3a} (V_{3a} для симметричной трехфазной цепи равно V_{2a}) и точку „ a “ определяем как пересечение окружностей, проведенных радиусами V_{1a} и V_{3a} из точек 1 и 3. Таким образом мы определим положение треугольника abc . При этом по положению $\triangle abc$ могут представиться три случая:

1-й случай. Трансформаторы имеют одинаковые диаграммы, и параллельная работа возможна без переключений. В этом случае в зависимости от той пары зажимов, которую мы соединим накоротко, мы получим диаграммы фиг. 11, с индексами, показывающими, какие зажимы были соединены накоротко.

Какую бы мы из вышеприведенных диаграмм ни получили, мы по виду полученной диаграммы сразу решили бы, во-первых,

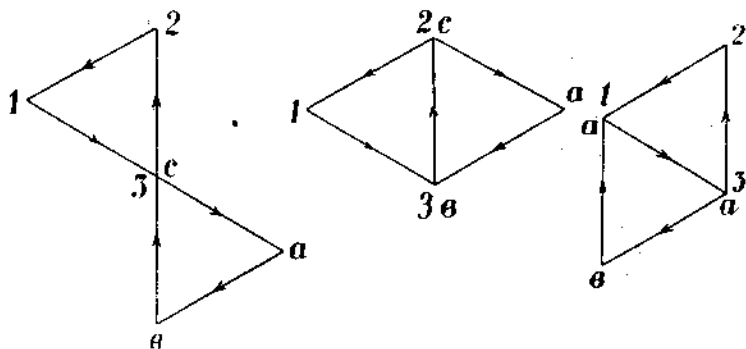
что параллельная работа возможна, а во-вторых — какие зажимы должны быть соединены накоротко.

2-й случай. Диаграмма нового трансформатора получается повернутой на 180° . В зависимости от пары зажимов, соединенных накоротко при измерении напряжения, мы можем получить диаграммы фиг. 12_{3с} или 12_{3в} или 12_{3а}.



Фиг. 11.

В этом случае параллельная работа без пересоединений невозможна. Для возможности параллельной работы необходимо сделать такие пересоединения, чтобы получить одинаковые диаграммы, т. е. диаграмму нового трансформатора надо повернуть на 180° .

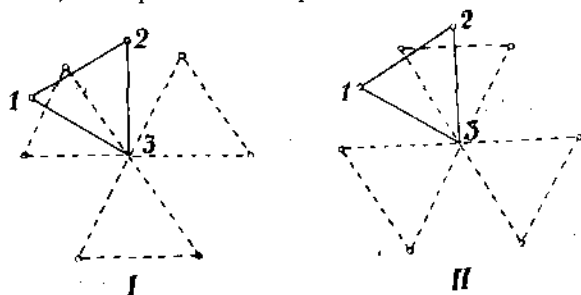


Фиг. 12.

3-й случай. Диаграмма нового трансформатора получается повернутой относительно диаграммы старого на угол отличный от 0 и от 180° , как показано на фиг. 13_г и 13_д. На фиг. 13_г и 13_д диаграмма работающего трансформатора нанесена сплошными

линиями, а три возможных положения диаграммы нового трансформатора изображены пунктиром.

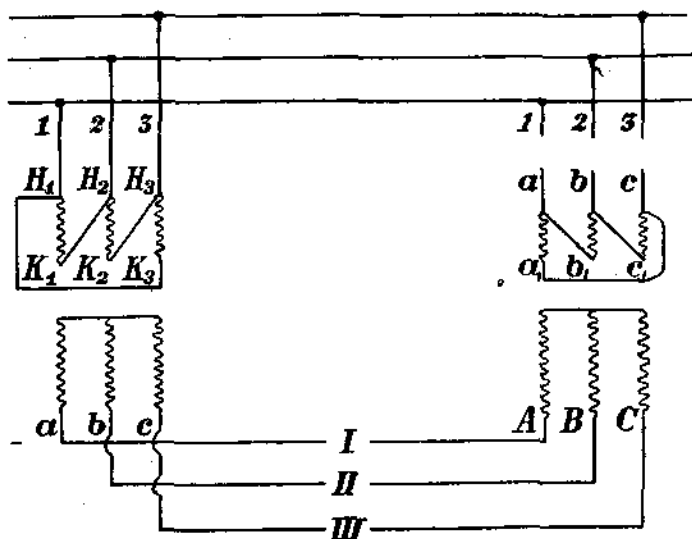
Не трудно видеть, что в данном случае диаграммы сдвинуты на 30° или 150° , и параллельная работа невозможна вообще.



Фиг. 13.

Посмотрим, каким образом можно произвести требуемый во втором случае поворот векторов в диаграмме.

Если новый трансформатор представляет соединение по группе III и IV, то это возможно осуществить тремя способами.



Фиг. 14.

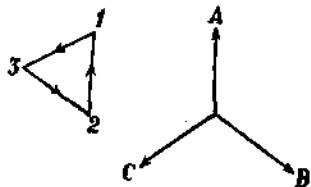
1-й способ, наиболее простой, — перекрестить две фазы на высоком напряжении (например, поменять места присоединения к новому трансформатору проводов II и III) (фиг. 9).

2-й способ — пересоединить концы треугольника внутри трансформатора и

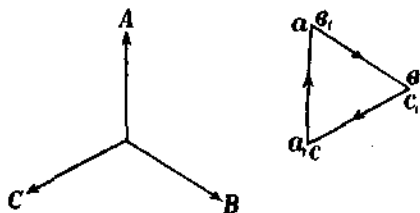
3-й способ — пересоединить концы звезды.

Рассмотрим два примера:

1-й пример: Допустим, что имеем для обоих трансформаторов на низком напряжении Δ , на высоком Λ . Обмотки у трансформаторов идентичны, но у нового трансформатора соединение тре-



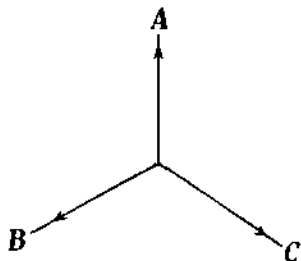
Фиг. 15.



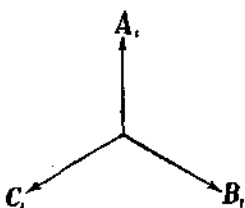
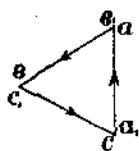
Фиг. 16.

угольником выполнено иным способом, нежели у старого, как это показано на фиг. 14 — схема, 15 и 16 соответствующие векторные диаграммы для старого и нового трансформатора.

Как не трудно видеть, если мы на новом трансформаторе поменяем места присоединения II и III проводов, а именно провод II присоединим к C и провод III к B, то диаграмма для нового трансформатора изменится и примет вид диаграммы фиг. 16 а,



Фиг. 16 а.



Фиг. 16 б.

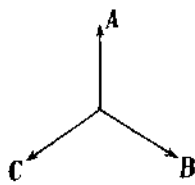
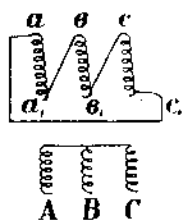
т.-е. таким путем мы вектор b_1, b поворачиваем на 240° и вектор c_1, c на 120° , что как раз и требовалось для того, чтобы диаграммы старого и нового трансформатора были идентичны.

После такого пересоединения надо только соединить соответствующие точки наглухо, а именно 1 — a, 2 — c и 3 — b.

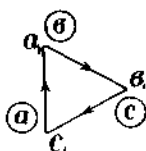
Таким образом перекрещивание двух фаз на высоком напряжении перевортывает треугольник на диаграмме трансформатора на 180° .

Это необходимо иметь в виду, так как иногда при пробе включить параллельно два трансформатора с идентичными обмотками и одинаковыми внутренними соединениями может получиться одна из диаграмм фиг. 12, вследствие возможного скрещивания фаз на высоком напряжении.

Результаты применения второго способа очевидны.



Фиг. 17.



Результаты 3-го способа.

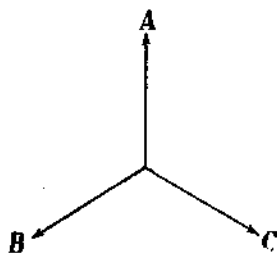
Если бы мы связали у нового трансформатора в нулевую точку звезды концы A , B и C , то мы вместо диаграммы

фиг. 16 получили бы диаграмму фиг. 16 *b* (так как магнитный поток изменил бы свое направление в сердечниках на 180°).

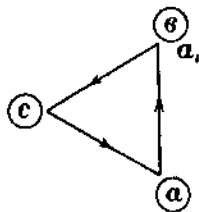
Для параллельной работы пришлось бы наглухо соединить точки $1-c$, $2-a$ и $3-b$.

2-й пример. Допустим, что у нового трансформатора соединение обмоток таково, как и у старого, но низковольтная обмотка и высоковольтная навиты в разные стороны, как показано на фиг. 17.

Применяя первый способ изменения диаграммы, а именно скрещивание фаз на высоком напряжении, например B и C , мы получим для нового трансформатора диаграмму фиг. 17 *a*, т.е. для параллельной работы надо будет соединить наглухо концы $1-b$, $2-a$ и $3-c$.



Фиг. 17 а.



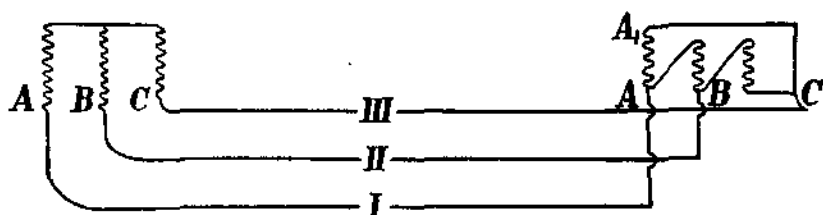
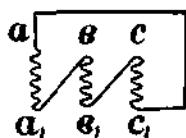
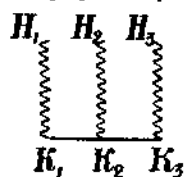
Применение 2-го и 3-го способа из предыдущего считаем ясным и здесь не будем излагать.

Из вышеприведенных примеров следует, что трансформаторы III и IV группы легко могут быть путем скрещивания фаз включены на параллельную работу.

Если же новый трансформатор принадлежит к 1-й группе, а старый ко 2-й, или наоборот, то параллельное включение воз-

можно лишь путем внутреннего переключения обмоток первичных или вторичных.

В этом случае скрещение фаз ничего не дает, так как оно изменяет только одновременно порядок фаз в обеих обмотках 2-го трансформатора.

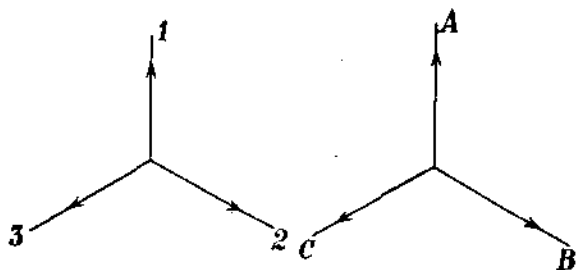


Фиг. 18.

Действительно, пусть имеем старый трансформатор со включением $\wedge \wedge$, новый $\Delta \nabla$, как показано на схеме фиг. 18 и диаграммах фиг. 18 а и 18 б.

Если перекрестить фазы II и III, то получим диаграмму для нового трансформатора, изображенную на фиг. 18 с, т.е. фазы поменялись местами, но диаграммы остались повернутыми одна относительно другой.

Итак, из вышеприведенного вытекают следующие положения о параллельном включении трансформаторов:

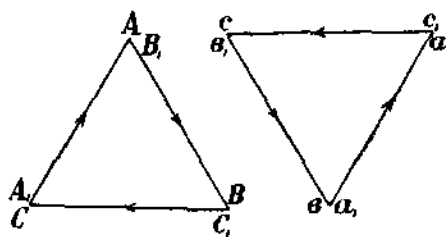


Фиг. 18 а.

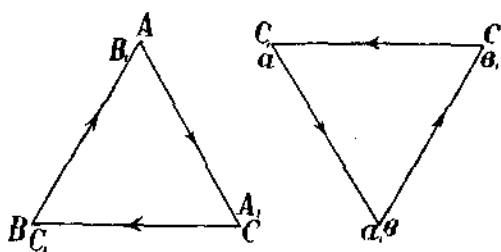
I—если трансформаторы принадлежат к одной группе, то для включения их в параллельную работу необходимо только отыскать их соответствующие фазы.

II—если один трансформатор принадлежит к 1-й группе, а другой ко 2-й, или наоборот, то для параллельной работы необходимо внутреннее переключение обмоток.

III—если один трансформатор принадлежит к 3-й, а другой к 4-й группе, то необходимо перекрестить фазы (на высоком напряжении).



Фиг. 18 б.



Фиг. 18 с.

IV—если один трансформатор принадлежит к 1-й или 2-й группе, а другой к 3-й или 4-й группе, то параллельное включение вообще невозможно.

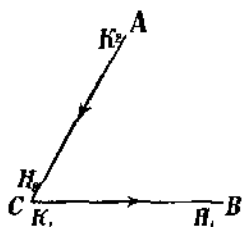
IV. Векторные диаграммы для V соединения и другие векторные диаграммы.

Выше мы для аналитического выражения мгновенных значений и для направления стрелок в диаграммах пользовались круговой подстановкой. Однако, в некоторых случаях удобнее такой круговой подстановкой не пользоваться.

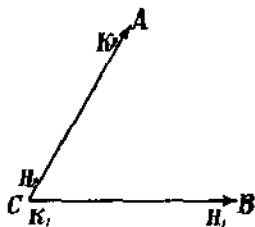
1) Для примера возьмем V соединение, которым часто пользуются для измерительных трансформаторов (применяя два трансформатора вместо трех), а также пользуются для силовых трансформаторов при порче одного из трех трансформаторов, образующих замкнутый треугольник.

Рассмотрим V соединение для генератора, схематически изображенного на фиг. 2.

Если бы мы выбросили одну из фаз, например III, то, соединяя



Фиг. 19 а.



Фиг. 19 б.

обмотки в таком порядке, как мы соединяли для Δ (например фиг. 6а), мы получили бы диаграмму фиг. 19а.

Однако, для операции с диаграммой V соединения удобнее рассматривать потенциалы точки A и B по отношению к точке C,

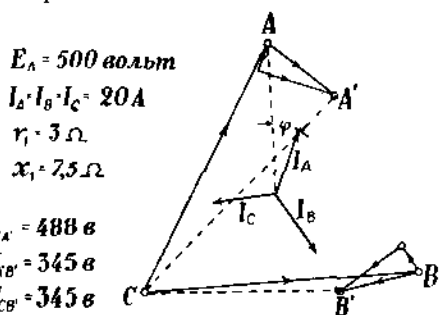
т.е. иметь стрелки, направленные от C к B и от C к A ; таким образом получаем диаграмму фиг. 19b.

Посмотрим для иллюстрации диаграмму равномерной нагрузки для генератора с соединением V . Пусть провода A , B и C нагружены током I при $\cos\varphi < 1$. Сопротивление фазы генератора r_1 и x_1 ; эл. силы генератора E_{CA} и E_{CB} будем считать направленными от C к A от C к B .

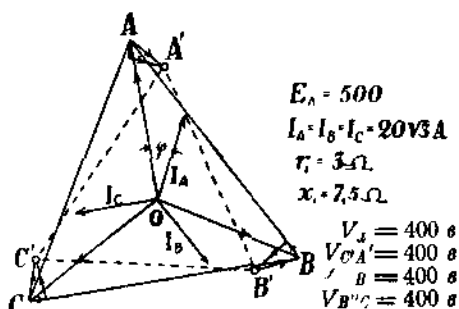
Потенциал точки C будем считать таким образом постоянным.

Диаграмму (см. фиг. 20) для ясности будем строить для численных значений, приведенных рядом с фиг. 20.

Если мы точку C будем считать фиксированной на диаграмме, т.е. потенциал точки C постоянным, то построение диаграммы напряжений сведется к весьма простой задаче. Именно будем



Фиг. 20.



Фиг. 21.

иметь, что фаза CA нагружена током J_A , а фаза CB нагружена током J_B . Вычитая ваттное и индуктивное падение напряжения $[J_A(r_1 + jx_1)]$ из эл. силы E_{CA} , получаем напряжение $V_{CA'}$, вектора CA на диаграмме. Прделав ту же операцию с эл. силой E_{CB} , получаем вектор напряжения $CB' = V_{CB'}$.

Как видно из полученных результатов на диаграмме фиг. 20, V соединение при симметричной нагрузке (проводов) дает значительное искажение Δ напряжений. Правда, для того, чтобы сделать диаграмму более наглядной, мы взяли весьма большую реактивность обмоток генератора (около 32%), если ток 20 А считать нормальным.

2) Рассмотрим векторные диаграммы для замкнутого Δ .

а) Обычный способ построения диаграмм при решении различных задач для замкнутого Δ сводится к преобразованию Δ в эквивалентную звезду. На диаграмме фиг. 21 приведена диаграмма напряжений для замкнутого Δ при симметричной нагрузке.

Для сравнения с диаграммой фиг. 20, фазные токи и $\cos\varphi$ взяты такие же, как и для V соединения (при этом линейные токи получаем в $\sqrt{3}$ раза больше, нежели в V соединении).

Для построения диаграммы напряжений Δ эл. силы ABC преобразовываем в звезду с фазными напряжениями E_A, E_B и E_C .

Потенциал точки O считаем постоянным (в данном случае его можно положить равным нулю). Вычитая из E_A ваттное и индуктивное падение напряжения [$J_A(r + jx_1)$], получаем фазное напряжение для звезды OA' . Прделав такую операцию со всеми лучами, получаем для эквивалентной звезды напряжения $V_A = OA'$; $V_B = OB'$ и $V_C = OC'$, или для Δ :

$$V_{CA'} = C'A', \quad V_{AB'} = A'B' \quad \text{и} \quad V_{BC'} = B'C'.$$

Способ преобразования Δ фазных эл. сил или напряжений в эквивалентную звезду обычно применяется в большинстве случаев в трехфазном токе. Возможно однако построение диаграммы для треугольника и без замены его эквивалентной звездой.

б) Приведем построение диаграммы напряжений Δ в том случае, если эквивалентной звездой не пользуются.

Рассмотрим случай равномерной нагрузки. Диаграмму построим для тех же данных, что и диаграмма фиг. 21.

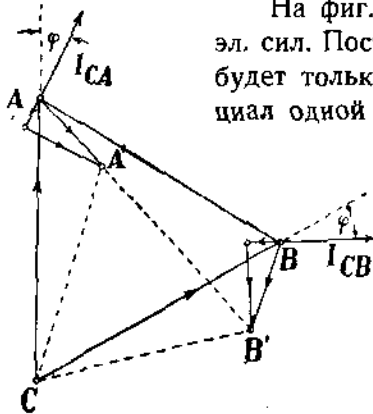
На фиг. 22 ΔACB представляет Δ фазных эл. сил. Построение падений напряжения возможно будет только в том случае, если мы примем потенциал одной из вершин Δ за постоянный.

Положим, это будет вершина C . Тогда E_{CA} и E_{CB} будем считать направленными, как указано на диаграмме стрелками.

Вычитая из E_{CA} ваттное и безваттное падение напряжения от тока I_{CA} [равное $I_{CA}(r + jx_1)$], получим напряжение $V_{CA'} = CA'$; а вычитая из E_{CB} падение напряжения ваттное и безваттное вследствие

прохождения тока I_{CB} по фазе CB [равное $I_{CB}(r + jx)$], получим напряжение $V_{CB'} = CB'$. Таким образом получаем Δ напряжений $CA'B'$.

Представление потенциала одной из вершин постоянным, конечно, условно. На самом деле постоянным потенциалом является



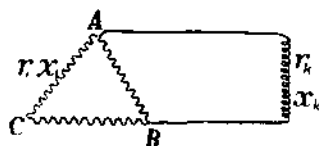
Фиг. 22.

центр тяжести Δ (если нет заземленной точки в системе). Но так как центр тяжести Δ не соответствует какой-либо реальной точке цепи в рассматриваемой диаграмме, то мы можем ввести такое условие. Следствия, вытекающие из такого условия, только те, что в общем случае при рассмотрении потенциала O — центра тяжести системы, мы должны были бы расположить точки A, B и C и $A' B' C'$ около точки O так, как они расположены в диаграмме фиг. 21.

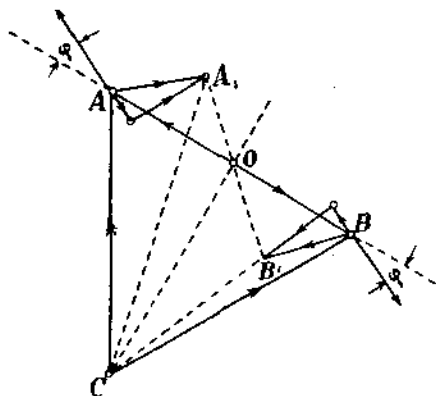
в) Построим аналогичную диаграмму для случая неравномерной нагрузки.

Рассмотрим случай, изображенный на схеме фиг. 23а (типичная задача на короткое замыкание между двумя проводниками).

Ток в этом случае, как не трудно видеть, можно определить, исходя из следующих соображений:



Фиг. 23а.



Фиг. 23б.

В цепи действуют две паралл. электродвижущие силы — 1-я эл. сила фазы AB и вторая эл. сила фаз AC и CB , включенных последовательно. Ток в генераторе распределится обратно пропорционально реактивностям двух ветвей, т.е. в ветви AB ток будет $2/3 I_k$, где I_k общий ток, а в ветви ACB $1/3 I_k$. Зная эл. силу E_{AB} , ток получим из равенства

$$J_k \dot{Z}_k + \frac{1}{3} I_k \cdot 2 \dot{Z}_1 = \dot{E}_{AB},$$

или

$$J_k = \frac{\dot{E}_{AB}}{\dot{Z}_k + \frac{2}{3} \dot{Z}_1}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{2}{3} x_1 + x_k}{\frac{2}{3} r_1 + r_k}.$$

Зная ток I_k и его сдвиг φ по отношению к эл. силе фазы AB , легко построить диаграмму напряжений.

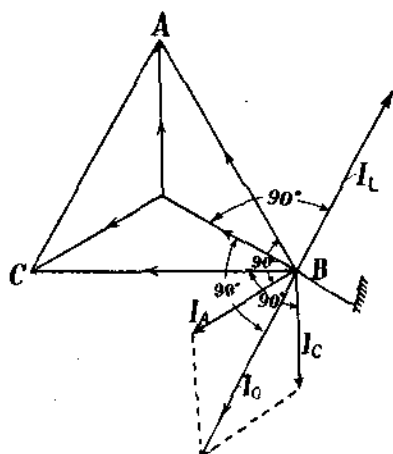
Диаграмму фазных эл. сил представляет ΔABC .

Потенциал точки C можно принять постоянным. Тогда, вычитая из E_{CA} падение напряжения O тока $\frac{I_k}{3}$, проходящего по фазе CA [именно $\frac{1}{3} J_k (r_1 + jx_1)$], получим напряжение $V_{CA'} = CA$. Далее, вычитая из эл. силы E_{CB} падение напряжения [равное $\frac{1}{3} J_k (r_1 + jx_1)$] в фазе CB , получаем напряжение $V_{CB'}$, CB' . Таким образом определяем Δ напряжения $CA'B'$.

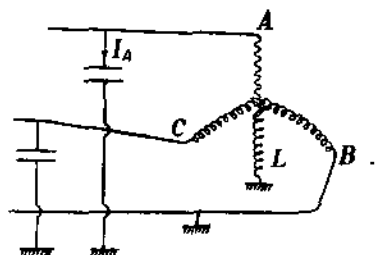
Можно построить диаграмму Δ напряжения и другим способом. Именно можно исходить из того, что потенциал точки O — середина фазы AB , остается постоянным. Тогда эл. силы в фазе AB на диаграмме можно принять направленными от O к A и от O к B (направление векторов тока всегда определяется углом φ). Учитывая падение напряжения от тока $\frac{2}{3} I_k$, проходящего в фазе AB и имеющего направление от O к A и от O к B , именно вычитая из E_{OA} падение напряжения $\left[\frac{2}{3} J_k \frac{1}{2} (r + jx) \right]$, получаем $V_{OA'}$, OA' и положение точки A' . Таким же образом определяем и положение точки B' .

3) Векторная диаграмма трехфазной системы при одной заземленной фазе.

Допустим, заземлился провод B . В этом случае потенциал B равен нулю, и естественно рассматривать потенциалы других проводов A и C по отношению к B . В таком случае диаграмма напряжений для 3-х проводов изобразится как приведено на фиг. 24 (диаграмма) и на фиг. 24а (схема).



Фиг. 24.



Фиг. 24а.

На схеме фиг. 24а представлен случай заземления одной фазы линии передачи при наличии индуктивного сопротивления ωL (катушка Петерсена) включенного в нейтрал генератора (трансформатора). При заземлении одной фазы и соответствующей

величине самоиндукции катушки L можно иметь равенство суммарного тока I_0 емкостей двух здоровых фаз току I_L , проходящему через самоиндукцию. (При равенстве токов I_0 и I_L через место заземления провода будет течь лишь ток, обусловленный потерями, т.е. ваттными сопротивлениями.)

На диаграмме 24 нанесены емкостные токи I_A и I_C соответственно проводов A и C и их результирующий емкостный ток I_0 , а также ток I_L катушки самоиндукции.

Для равенства токов I_0 и I_L очевидно необходимо, чтобы

$$I_0 = I_A \sqrt{3} = E_\varphi \sqrt{3} \sqrt{3\omega C} = \frac{E_\varphi}{\omega L}, \text{ или } L = \frac{1}{3\omega^2 C}.$$

Приведенные выше диаграммы фиг. 19, 20, 22, 23 б и 24 отличаются от обычно приводимых тем, что на них взято более наглядное направление стрелок, нежели то, которое получилось бы при применении круговой подстановки. Но необходимо иметь в виду, что круговая подстановка — операция чисто математическая, и не всегда она может служить для ясного представления явлений физических.

У. Определение порядка следования фаз.

Для решения симметричных трехфазных систем, напр. фиг. 21, для включения в параллельное соединение трансформаторов или генераторов (где требуется находить одноименные фазы) не трудно видеть, что знание порядка фаз при построении диаграммы является необязательным, так как вследствие симметрии результаты остаются теми же и для зеркального изображения диаграмм, что и для действительного. Но при несимметричных системах требуется построение диаграммы, соответствующей действительному порядку фаз (напр., фиг. 20).

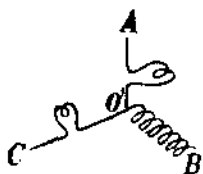
Знание действительного порядка следования фаз во многих случаях практики является необходимым. Например, включение приборов, измеряющих $\cos\varphi$, релэ обратной мощности и т. п.

Опытное определение порядка следования фаз может быть произведено различными способами.

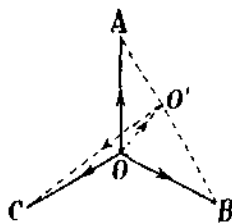
Приведем наиболее простой способ.

Допустим, имеем три провода трехфазной системы. Назовем их A , B и C . Включим звездой 2 лампы накаливания и реактивную катушку, имеющую индуктивное сопротивление примерно равное сопротивлению лампы. Тогда, если последовательность фаз ABC ,

то лампа *A* будет гореть с ярким накалом, а *C* совсем тускло. Если последовательность фаз будет обратная, именно *CBA*, то лампа *C* будет под накалом, а *A* погаснет.



Фиг. 25.



Фиг. 26.

В вышесказанном не трудно убедиться, если для приемника, изображенного на фиг. 25, найти нейтральную точку.

Изложим способ нахождения потенциала нейтральной точки в общем виде, а затем применим его к случаю, изображенному на фиг. 25. Если у нас

имеется трехфазная система, то генератор такой системы можно всегда представить включенным звездой с нейтральной точкой *O* в центре тяжести (фиг. 26).

Если мы включим звезду, сопротивление ветвей которой различно, то нейтральная точка звезды приемника не будет совпадать с точкой *O*, а будет иметь на диаграмме какое-либо положение *O'*. Обозначая фазное напряжение генератора *OA*, *OB*, *OC* через V_1 , V_2 , V_3 и фазные напряжения приемника через V'_1 , V'_2 и V'_3 , а напряжение между точкой *O* и *O'* через $V_0 = OO'$, сопротивления фаз через Z_1 , Z_2 и Z_3 , а токи в приемнике через I_1 , I_2 и I_3 , будем иметь:

$$J_1 = \frac{\dot{V}'_1}{Z_1} = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_0}{Z_1};$$

$$J_2 = \frac{\dot{V}'_2}{Z_2} = \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_0}{Z_2};$$

$$J_3 = \frac{\dot{V}'_3}{Z_3} = \frac{\dot{V}_3 - \dot{V}_0}{Z_3},$$

или, суммируя, получаем:

$$J_1 + J_2 + J_3 = 0 = \frac{\dot{V}_1}{Z_1} + \frac{\dot{V}_2}{Z_2} + \frac{\dot{V}_3}{Z_3} - V_0 \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right),$$

откуда

$$\dot{V}_0 = \frac{\sum \frac{\dot{V}}{Z}}{\sum \frac{1}{Z}}.$$

Таким образом, если известны линейные или фазные напряжения генератора (V_Δ или V) и сопротивления ветвей приемников, то можно определить V_0 и фазные напряжения приемника.

Определение это проще всего произвести графоаналитическим способом.

На диаграмме фиг. 27 построено положение точки O' и фазные напряжения V_1 , V_2 и V_3 для случая напряжения между проводами $V_1 = 173$, или $V = 100$ вольт, сопротивления $Z_1 = r_1 = 100 \Omega = r_s = Z_s$.

Сопротивление катушки $Z_2 = jx = j100 \Omega$.

Находим $\frac{V_1}{Z_1} = \frac{100}{100} = 1$ амп. и откладываем его по направлению V_1 ; получаем вектор OK .

Находим $\frac{V_3}{Z_3} = \frac{100}{j100} = -j$ амп.

Этот вектор мы должны отложить под прямым углом к V_2 в сторону отставания.

Получим вектор OL .

Также находим $OM = \frac{V_3}{Z_3} = 1$ Амп.

Геометрическая сумма $OK + OL + OM = ON = \Sigma \frac{V}{Z}$.

Далее находим:

$$\frac{1}{\Sigma Z} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{100} + \frac{1}{j100}} = \frac{1}{0,02 - j0,01} = \frac{0,02 + j0,01}{5 \cdot 10^{-4}} = 40 + j20 \Omega.$$

Умножая $ON = 1,42 A$ на $40 + j20$, получим V_0 , равное вектору OO' , и таким образом находим положение точки O' .

Из диаграммы получаем напряжение

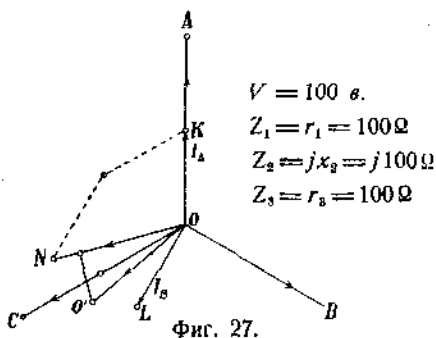
на лампе между проводом A и нейтралью $O' - 150$ в.,

" " " " " C " " $O' - 38$ в.

Не трудно видеть, что при другом следовании фаз (вращение векторов по часовой стрелке) точка O' разместилась бы вблизи от точки A .

Заключение.

В вышеприведенной трактовке векторных диаграмм автор попытался остановиться на тех положениях, которые являются как будто основными и общепринятыми, но в то же время не



Фиг. 27.

всегда подчеркиваются в изложении диаграмм, а иногда и не соблюдаются при пользовании диаграммами.

Несмотря на простоту вопроса, дать исчерпывающее освещение вопроса о векторных диаграммах в журнальной статье затруднительно. Тем не менее автору представляется, что основные положения им отнечены в достаточной мере.

Эти основные положения сводятся к следующему.

1) Синусоидальные величины могут изображаться векторами, при условии, что длина вектора равна в определенном масштабе амплитуде (или действующему значению); вектор представляется вращающимся с равномерной угловой скоростью $2\pi f$ (обычно против часовой стрелки). При этом мгновенные значения синусоидальной величины могут быть получены как проекции вращающегося вектора на некоторую неподвижную ось.

2) Векторная диаграмма дает таким образом величину амплитуд (или $\frac{\text{амплитуд}}{\sqrt{2}}$) и их взаимное расположение, т. е. фазные углы, или в трехфазном токе последовательность фаз (порядок следования фаз).

3) Вектора на диаграммах изображаются в начальном положении, при чем их положение на плоскости фиксируется, если фиксируется начало отсчета времени или та неподвижная ось, на которую должны проектироваться вектора для получения мгновенных значений.

Неподвижная ось обычно не изображается на диаграмме, и вопрос о фиксированном положении векторов на плоскости возникает только при параллельной работе (сравнении двух диаграмм).

4) Обладая вполне определенным взаимным расположением, а иногда и фиксированным положением на плоскости, векторы не обладают определенным направлением (главное отличие от векторов физических). Их направление (направление стрелок) условно и может изменяться на 180° . Само направление векторов (направление стрелок) вызывается необходимостью фиксирования направления токов. Направление векторов тока определяется углом φ между током и соответствующим вектором эл. силы или напряжения и является необходимым для наглядного построения падений напряжений и т. д.

5) Построение диаграммы напряжений по диаграмме эл. сил при данных условиях нагрузки является удобным и наглядным,

если для эл. сил есть фиксированная точка, потенциал которой мы (хотя бы условно) принимаем постоянным (напр., нейтральная точка звезды, вершина угла в \surd соединении, вершина Δ и т. д.).

6) В многофазных системах при рассмотрении многих вопросов весьма полезно применение круговой подстановки. Надо помнить, однако, что круговая подстановка — операция математическая и не следует ее применять там, где она усложняет картину.

7) Во многих вопросах симметричных систем возможно построение диаграмм без знания действительного порядка следования фаз, так как результаты остаются верны как для действительной диаграммы, так и для ее зеркального изображения. Необходимо однако помнить, что реально существующая последовательность фаз является основным элементом векторной диаграммы, и знание ее является необходимым не только для уяснения сущности явлений в трехфазном токе, но и для чисто практических целей.

ОПЫТЫ ПЕРЕОБОРУДОВАНИЯ КОТЕЛЬНОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ГОР. АРХАНГЕЛЬСКА ПРИ ПЕРЕХОДЕ С УГЛЯ НА ТОРФ И ДРЕВЕСНЫЕ ОТБРОСЫ.

В. С. Кевлич.

Цель настоящего очерка — дать картину работы котельной Архангельской Городской Центральной Электростанции за период времени с момента пуска ее в ход в 1915 г. по сей день, описать расширение ее, недавно произведенное, и наметить дальнейшие перспективы ее работы и переоборудования.

Работа котельной за период 1915—1923 гг.

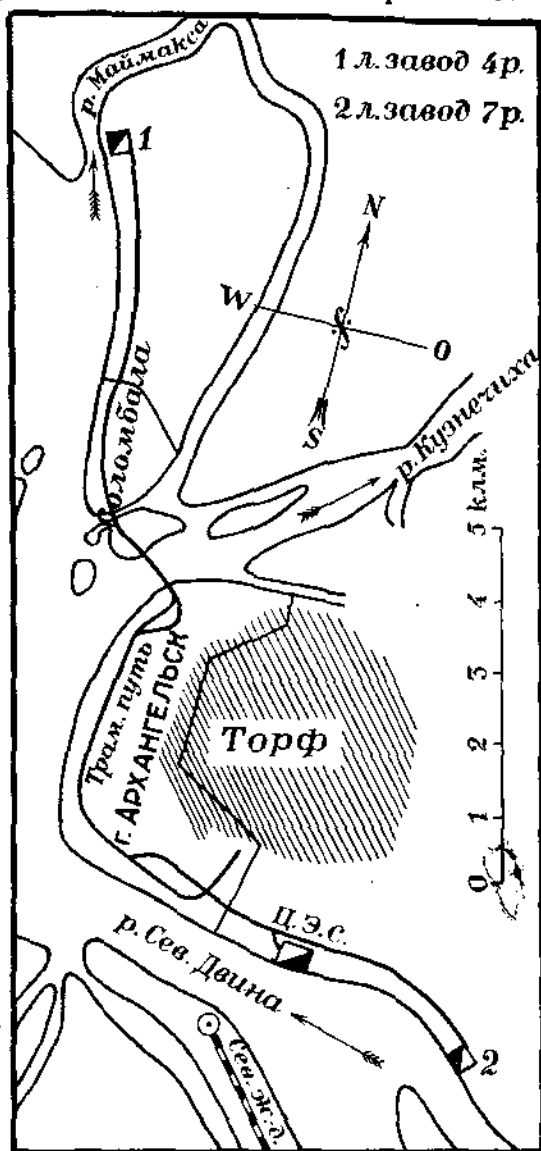
В 1914 г. Архангельское Городское Общественное Самоуправление начало строить Центральную Электростанцию и трамвай. Место для станции было выбрано удачно, за городом на берегу р. Сев. Двины (фиг. 1). Станция должна была снабжать энергией трамвай и город и была пущена в ход в конце 1915 г. Котельная была оборудована двумя котлами Гарбе завода бр. Зульцер по 225 м^2 каждый, с перегревателями по 93 м^2 , перегревающими пар до 300°С при 13 atm. раб., и двумя экономайзерами Грина по 168 м^2 . Оба котла обслуживались одним дымососом сист. Швабаха с электроприводом. Котлы были снабжены поршневыми угольными топками Нибо-Ниссен с поверхностью колосниковой решетки у каждого котла в $6,6 \text{ м}^2$ и нижним дутьем через особый канал от электровентилятора. Питались котлы водой из реки, при чем вода сначала пропусклась через водоочиститель сист. Зейферта на 25 м^3 в час, а затем шла в подземный каменный бассейн емкостью в 50 м^3 , откуда уже электронасосом подавалась в экономайзеры. Качество воды определяется ее жесткостью, которая колеблется в зависимости от времени года от 6 до 9° по

французской системе. Предназначены были эти котлы для питания паром трех турбогенераторов Лаваля по 500 *kWh*. при 3000 оборотов в минуту, со впрыскивающими конденсаторами.

Постройка электростанции и трамвая, как это было почти во всех русских городах, потребовала от б. городского самоуправления большого напряжения для изыскания средств, которых все равно хватило в обрез. Результатом „экономии“ средств явилось техническое несовершенство некоторых сооружений. В частности для котельной главным недостатком явилось применение у турбин впрыскивающих конденсаторов, которое заставило питать котлы сырой водой из реки.

При пуске станции в ход в 1915 г. топливом для нее был выбран каменный уголь, который в то время доставлялся совершенно свободно на иностранных пароходах, особенно оживленно посещавших Архангельский порт в военное время. Котельная работала на угле до 1919 г., когда,

в связи с очищением Северной Области англичанами и почти полным прекращением сношений с заграницей, пришлось применить местные сорта топлива. Топки были переделаны на простые



Фиг. 1.

колосниковые (площадь колосников $6,5 m^2$, с увеличением объема топочного пространства до $12 m^3$); было налажено добывание торфа одной машиной, и была организована доставка реек с лесопильного завода в $3 km$ от станции, для каковой цели к нему был проложен специальный трамвайный путь (фиг. 1). В 1919 и 1920 гг. сжигались остатки угля, и был осуществлен переход на рейки, дрова и торф. С 1921 г. станция уже целиком работает на местном топливе. Понятие о количествах разных сортов топлива, расходуемых станцией, и о постепенном переходе на местные сорта, дает диаграмма (фиг. 2).

Так как рейки можно удобно подвозить только с одного лесопильного завода в $3 km$ к югу от станции (фиг. 1), и на него не всегда можно рассчитывать, так как он находится в руках другого учреждения (Северолеса), а также и потому, что в часы максимальной нагрузки в топки котлов Гарбе все равно приходилось пускать дрова, то с 1922 г. было обращено внимание на собственные лесозаготовки, которые могли бы удовлетворить потребность станции в дровяном топливе. Организовав заготовки дровяника, пришли к мысли вместе с ним заготавливать и пиловочник и, распиливая его на собственном лесопильном заводе, отбросы пускать в топки котлов, а доски продавать за границу. Для этой цели в 1921 г. на территории станции был собран из остатков сгоревших архангельских заводов лесопильный завод на одну раму, который был пущен в ход в феврале 1922 г. В конце 1922 г. и в начале 1923 г. были установлены еще две рамы, а в июне 1924 г. была установлена четвертая рама. Все лесопильное производство было электрифицировано (частью при напряжении $3300 V$, частью $220 V$) и дало при реализации продукции за границей довольно значительный валютный фонд, шедший на приобретение за границей необходимых машин и технических материалов. Кроме этого, наличие столь крупного моторного потребителя электроэнергии чрезвычайно благоприятно отозвалось на графике электростанции, сильно увеличив ее средний годовой коэффициент использования; в 1922 г. коэффициент пользования станции ¹ был $38,2\%$, в 23 — $40,3\%$, в 24 — 51% и в 25 — 56% .

Далее мы приводим краткие характеристики применяющихся в настоящее время на станции сортов топлива.

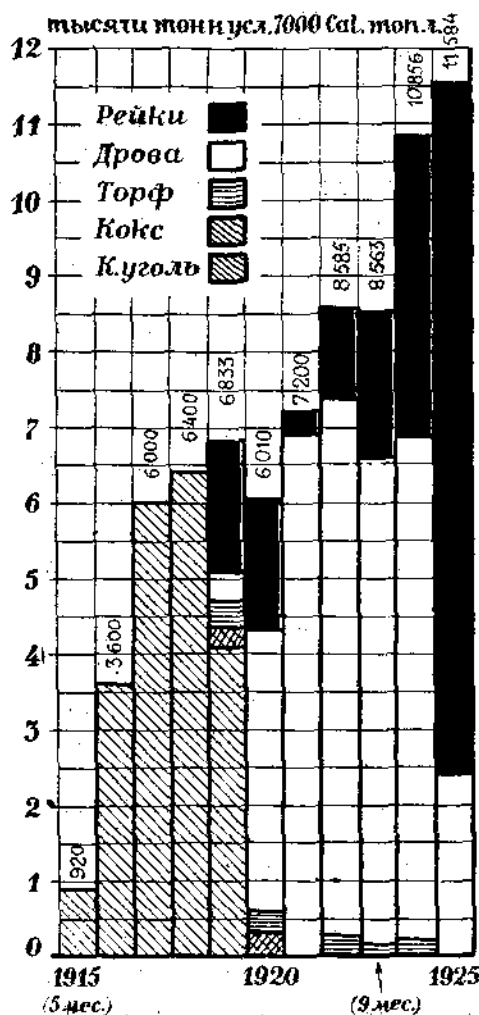
¹ По располагаемой рабочей мощности $2 \times 500 kWh$, не считая третьей резервной машины.

Дрова. Дрова заготавливаются на собственных лесозаготовках из сухостойного соснового леса и идут весной по воде в плотах к электрической станции, где выкатываются на берег четырьмя лесокатными машинами. Далее, на дровяных биржах они превращаются в дрова двух сортов, — аршинку и балансы. Балансы в массе представляют кряжи длиной 2,13 м, диаметром 3 — 6 вершк., вырезанные частью из сухостойного, частью из сырорастущего фаутного леса. Балансы начинают поступать в котлы месяца через два после выкатки, почему содержание влаги в них довольно значительное и доходит до 50%. Для питания котлов в моменты максимальной нагрузки на станции всегда имеется запас выдержанных сухих балансов (содержание влаги 20 — 30%), который служит также запасом на случай различных нарушений нормальной эксплуатации (слишком сырые рейки или балансы, работа на выхлоп и пр.). Что же касается их средней теплотворной способности, то приведение расхода дров к нормальному 7000 cal. топливу до сих пор производилось по эквиваленту 1 куб. саж. дров = 95 пуд. усл. 7000 cal. топлива. Эта цифра близко совпадает с выводами проф. В. Н. Шретера,¹ который дает в качестве практического эквивалента для дров Северного района цифру 1 куб. саж. = 85 пуд. усл. 7000 cal. топлива. Что можно сделать для улучшения этого топлива? Очевидно, что мероприятия в этом отношении должны быть направлены к уменьшению влажности. Проф. К. В. Кириш в своей книге „Дрова, как топливо“ дает указания на сильное падение теплоценности дров с повышением их влажности, а также на падение при этом температуры в топке на 100 — 150°, что может уменьшить полезное действие дров весьма значительно. Проф. В. Н. Шретер приводит цифру в 15% понижения полезного действия дров при увеличении влажности их с 25 до 50%. Эти цифры говорят сами за себя. Уменьшения влажности можно добиться заготовкой балансов исключительно из сухостойного леса (влажность на 20 % меньше, чем у сырорастущего), и выдерживанием их на воздухе перед пуском в топку в течение более долгого времени, чем сейчас, что теперь будет возможно, так как в 1925 г. предприятия получили в свое распоряжение большую площадь под биржу, дающую возможность держать на ней значительные количества древесины всех сортов.

¹ Проф. В. Н. Шретер. Топливо Северного района. Техничко-Экономический Вестник. Ноябрь, 1921 г.

Дровяник свыше 6 вершк. на балансы не разделяется, вследствие неудобства обращения с такими толстыми балансами при топке, а режется и колется на аршинные дрова, которые

Годовой расход топлива



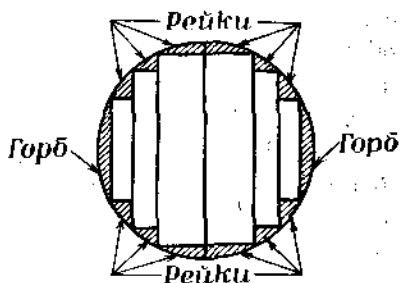
Фиг. 2.

идут так же, как и сухие балансы, в критические моменты эксплуатации. Вообще же следует сказать, что дрова постепенно вытесняются из топливного баланса станции более „естественным“ и дешевым топливом — отбросами лесопильных заводов, и с пуском в ход новых котлов Babcock-Wilcox должны исчезнуть совершенно. В настоящее же время при работе на котлах Гарбе приходится в часы максимальной нагрузки пускать в топку дрова и всегда держать наготове запас сухой аршинки на случай разных неожиданностей. Потребление дров в настоящее время (см. диагр., фиг. 2) сильно сократилось, с переходом же на работу исключительно на новых котлах они должны совершенно исчезнуть, заменяясь дробленой рейкой.

Отбросы лесопильных заводов. Отбросы, получаемые от лесопильных заводов, могут быть разделены на следующие категории: опилки, рейки, горбыли и так называемые ступьчики.

По своему строению их можно разделить на две группы: опилки — это совершенно измельченная древесина, а рейки, горбыли и ступь-

чики — куски дерева той или иной формы. Рейки — это срезаемые обливны досок, горбыли — крайние части кряжа при распиловке, а ступльчики — это обрезки досок при сортировке и вырезывании из них товарных досок (фиг. 3). Рейки и горбыли тут же на заводе режутся на куски длиной по 2,13 м, грузятся на вагоны и отправляются в котельную. Одна кубическая сажень реек в виду высокой их влажности (бревна на завод подаются часто прямо из бассейна, и во всяком случае сырораствующие) принималась равной всего только 80 пудам = 7000 *cal.* условного топлива. Уменьшение влажности до подачи в топку без капитальных затрат невозможно, потому что складывание их в особые штабеля для просушки с тем, чтобы после просушки опять грузить на вагоны и везти в котельную, мало достигает цели, так как рейки в штабелях лежат сплошной массой и все равно сохнут медленно, и, кроме того, погрузка и выгрузка их очень кропотлива и трудна. С уменьшением влажности их следует бороться другим путем — путем применения шахтных топок (новые котлы В.-В.),



Фиг. 3.

с введением для просушки топлива в шахту добавочного воздуха. Для интенсификации этого процесса в шахтах новых котлов рейку вводят в измельченном виде, пропуская ее через дробилку и отправляя в шахту по транспортеру. Такие дробилки работают экономично (дробилка на 25 *м³* в час берет 10 *HP* и стоила в довоенное время около 900 р.) и помимо того, что измельчение благоприятствует большому тепловому эффекту, облегчается и удешевляется транспорт реек к шахтам топок, ибо измельченные рейки подаются очень легким и простым транспортером. Что же касается ступльчиков, то это большею частью обрезки досок 10—30 *ст* длиной, количество их незначительно, и они большею частью идут для хозяйственных нужд, так что о них, как о массовом топливе, серьезно говорить не приходится.

Как видно из диаграммы (фиг. 2) рейки теперь играют в топливном балансе станции превалирующую роль, что следует считать вполне естественным, ибо рейки — это наиболее дешевый вид топлива Архангельского района, являющийся отбросом лесопильного производства, который представляет для заводов большую

обузу, требуя расходов на их уборку и отвозку. На большинстве лесопильных заводов рейки сейчас играют роль земляного балласта; они служат для поднятия низких мест биржи, для засыпки трясин и для устройства набережных, а зачастую просто сжигаются в кучах позади заводских территорий на так называемых „огнищах“. Стоимость реек у топки котла гор. эл. станции составляет из стоимости их погрузки и транспорта и превращения их в вид, удобный для сжигания (резка пилой, или дробление). В среднем следует считать стоимость 1 куб. саж. реек в котельной гор. эл. станции в 5 р., в то время как куб аршинки стоит 18 р. При пересчете же на условное 7000 *cal.* топливо стоимость 100 пудов его в рейках — 6 р. 25 к., а в аршинке 18 р. 95 к. Что касается обеспеченности этим топливом, то собственный 4-х рамный завод при работе в 3 смены обеспечивает годовой запас до 5000 куб. саж. реек, что при средней цифре выработки в 600 *kWh* из 1 куб. саж. обеспечивает годовую продукцию станции в 3106 *kWh*. Если же считать, что завод при станции был бы закрыт, то лесопильный 7-ми рамный завод Северолеса № 3 (фиг. 1) может покрыть с избытком всю потребность станции в рейках, так как на нем ежегодно получается до 15 000 куб. саж.

Что касается опилок, то попытки применения их в существующих котлах с простыми колосниковыми решетками закончились неудачей; часть опилок проваливается в зольники сквозь колосники, а часть уносится дымососом через трубу наружу. Поэтому в настоящее время опилки в качестве топлива в колосниковых топках котлов Гарбе не применяются, в топках же новых котлов они примешиваются в небольшом количестве к дробленой рейке.

Весьма интересный вопрос о возможности сжигания опилок в pulverизированном виде требует обширной опытной разработки, так как, насколько нам известно, опыты в этом направлении еще не производились, и они должны стоить больших денег, так как объем топки в этом случае должен быть громадным.

Торф. Торф добывается с болот, находящихся в непосредственной близости от города (фиг. 1), располагающих запасом торфа, достаточным по самым скромным подсчетам для гор. эл. станции на 140 лет. Добывание его ведется с 1919 г. одной торфяной машиной с электроприводом. Роль торфа в топливном балансе станции видна из диаграммы (фиг. 2). В среднем за сезон добывается до 500 т воздушно-сухого торфа со средней влажностью в 20%, с теплотворной способностью в 3400 *cal.* Опыт

нескольких лет, 1919, 1922 и 1923 гг., торфодобычания доказал полную его осуществимость и в Архангельских условиях, и оно в будущем может развиться до очень крупных размеров в связи с расширением города и

осушением его площади.

Постоянного торфодобычания для Городской

Электростанции не производится, потому что, имея

столь дешевое топливо как рейки, нет смысла

пользоваться торфом, который при небольшом масштабе разработок обходится

значительно дороже реек. В среднем 100 пуд.

условного 7000 cal. топлива в торфе обходятся

20 р. 50 к.

Что же касается степени перегруженности котельной, то загрузка станции пошла очень быстрым

темпом, в чем, конечно, сыграли немалую роль условия военного времени,

и уже в 1919 г. станция оказалась перегруженной (см. диагр. фиг. 2а), а затем

встал вопрос о ее расширении путем установки нового мощного турбогенератора. Котельная почти

с самого начала работала ненормально без резерва, что, конечно, не могло не отозваться на

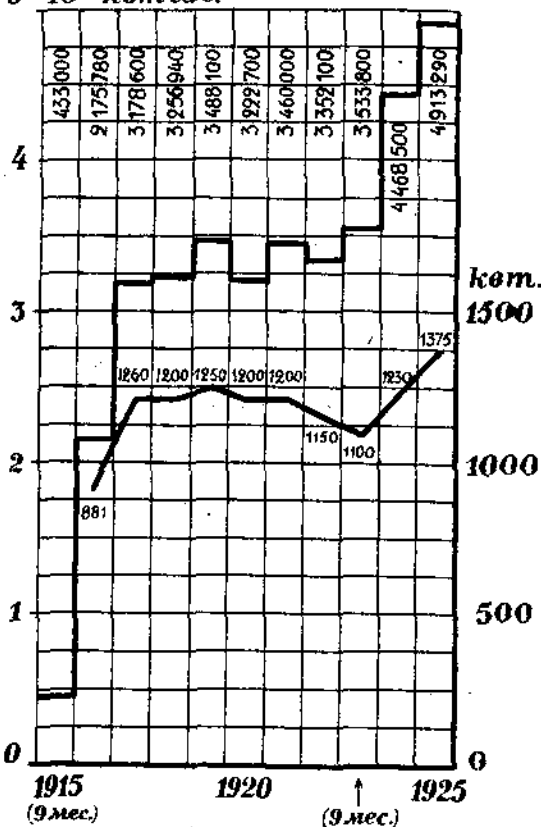
состоянии котлов. Если перегрузка турбогенераторов станции шла быстрым

темпом, то еще более остро она ощущалась в котельной. Дело в том, что с переходом на дровяное топливо

съем пара с 1 m^2 котлов резко упал вследствие того, что переделанные на дрова топки были далеки от совершенства,

Выработка и максимумы

$5 \times 10^6 \text{ кВт.ч.}$



Фиг. 2а.

и мощность их сильно уменьшилась. С другой стороны, лопатки турбин быстро разъедались паром, полученным из не особенно тщательно очищенной воды, и расход пара турбинами очень сильно увеличился против нормального. Обе эти причины, явившиеся следствием ненормальностей военного времени и периода гражданской войны, обусловили сильную перегрузку котлов, и вопрос о расширении вполне актуально стал в 1919 г.

Установка новых котлов. Оккупация Северного края англичанами вынудила передать заказ фирме Бабкок-Вилькокс. Котлы были получены в Архангельске осенью 1921 г., и с января 1922 г. начались подготовительные работы по устройству основания и фундаментов для них. С перерывами подготовительные работы шли до конца 1922 г. С декабря было приступлено к сборке котлов, которая и была закончена весной 1924 г.

Установлено два котла по 606 м^2 каждый, доставляющих пар при 13 раб. atm. и 325°C . Каждый котел имеет перегреватель в 203 м^2 и экономайзер Грина в 255 м^2 . Тяга искусственная, прямая, в железную трубу двумя дымососами с электроприводом. Каждый котел снабжен двумя комбинированными шахтно-цепными топками, по две на каждый котел.

Котлы. Самые котлы общеизвестного типа „W. I. F.“ имеют каждый по 3 барабана диам. $1,22 \text{ м}$ и по 27 секций, каждая по 12 труб диам. 100 мм и длиной 5485 мм . Перегреватель нормального типа Бабкок-Вилькоккс вставлен между первым и вторым ходами и имеет поверхность перегрева в 203 м^2 . Взаимное расположение отдельных частей котла и система подвески барабанов обычного типа Бабкок-Вилькоккс.

Экономайзеры. Каждый котел имеет экономайзер Грина в 255 м^2 поверхности нагрева, состоящий из 20 секций, в каждой по 10 труб. Скребки приводятся в движение от электромоторов по 2 HP каждый. Система заслонок позволяет каждому котлу работать со своим экономайзером или без него.

Тяга. Над экономайзерами на железном помосте установлены два дымососа с электромоторами и железная труба диам. $2,3 \text{ м}$, высотой от колосниковой решетки 23 м . С обеих сторон трубы установлены два мощных дымососа прямой тяги с диаметром роторов $1,14 \text{ м}$, приводимых в движение электромотором в 30 HP, соединенным с дымососом муфтой. Топочные газы, пройдя экономайзеры, входят в трубу, далее в дымососы и выкидываются ими в верхнюю часть трубы. При работе дымососов труба

на их высоте перекрывается главной заслонкой. Такое расположение дымососов дает возможность очень гибкой регулировки тяги, работая на любой котел любым дымососом или без них естественной тягой. Следует сказать несколько слов о моторах дымососов: они на шариках и совершенно закрытого типа с ребрами для охлаждения, что, конечно, не могло не отразиться на их весе. Каждый мотор весит 1,7 *t*. Пускаются они в ход стартерами авто-трансформаторного типа.

Топки. Наиболее интересной частью котлов являются топки. При заказе котлов фирме были поставлены условия предложить топку для дров, обрезков лесопильных заводов, торфа и каменного угля. Топки, которыми снабжены котлы (по 2 на котел), представляют из себя нормальные наклонные механические топки Бабкок-Вилькокс с электроприводом шириною 1,83 *m* и с поверхностью решетки в 7,8 *m*², с углом наклона решетки в 10°. Эти топки скомбинированы с шахтами для торфа и дров. Шахта ограничена спереди передней стенкой топки, а сзади сводом, имеющим пустую внутреннюю полость, в которую и поступает через боковые каналы в стенках топки воздух, отчасти для подсушки топлива в шахте, отчасти как вторичный на решетку. Воздух этот выходит через ряды мелких отверстий размерами 115 × 115 *mm*, раскаленный при прохождении в подводящем канале и внутренней полости свода. Объем шахт топок одного котла 2 × 7,5 = 15 *m*³; объем топочного пространства одного котла 40 *m*³.

Нормальную производительность своих котлов фирма определила в 12 *t* с котла, т.е. около 20 *kg* с квадратного метра, в час. По совету фирмы при топке углем шахта не работает, топливо загружается через передний ковш, и колосники работают нормально с одной из своих скоростей (их всего 4: от 2,6 до 7,6 *m* в час). При пользовании каменным углем с теплотворной способностью не ниже 6000 *cal*. фирма гарантирует кратность испарения в 6¹/₂; для торфа 3—3¹/₄ и для дров 3¹/₂, с пересчетом на условный пар в 637 *cal*.

Подача топлива. Вагонетки, груженные рейками (длина реек 2,13 *m*), подаются к котельной в особый загрузочный деревянный сарай, где они разгружаются вручную в желоб дробилки и проходят ее, измельчаясь в куски, размерную величину которых легко регулировать от 1 до 20 *cm*. Производительность дробилки 25 *m*³ рыхлой древесной массы в час, и приводится она в действие от электромотора трехфазного тока. Из дробилки измельченные рейки

попадают на ленточный транспортер, который поднимает их на загрузочную площадку новых котлов, откуда они ссыпаются в шахты. Транспортер выстроен собственными силами и средствами. Остов деревянный, ролики железные, лента сплетена из бечевки, идущей на траловые сети для ловли рыбы. Приводится он в действие эл. мотором 3 *HP*, скорость ленты 15 *m* в минуту. Это устройство является временным. В будущем предполагается устроить перед котлами железные бункера и мощный транспортер. Существующее устройство для подачи топлива и его изменения в связи с механическими топками новых котлов позволили сильно сократить расходы на рабсилу. Смена у котлов Гарбе состоит зимой в среднем из 6, у котла Бабкок-Вилькокс из 4; при окончательной механизации процесса подачи топлива — из 2 человек.

Вывоз золы. Для отвоза золы сзади котлов устроен особый коридор шириною в 1,5 *m* под 2-м и 3-м оборотами. Непосредственно к нему примыкает такой же коридор под старыми котлами Гарбе. Через особую дверь зола вывозится маленькими вагонетками наружу, сразу выгружается на трамвайные грузовые вагонетки и отправляется или на свалку или на новые трамвайные пути в качестве балласта.

Продувание и отвод грязной воды. Для отвода грязной воды спереди и сзади котлов заложены в основании бетонные, перекрытые плитами, канавы со сточными колодцами, которые отводят грязную воду в канализацию на дворе станции. Продувные трубы вместе с трубами старых котлов выведены в особый деревянный колодец на дворе станции со спуском воды в реку.

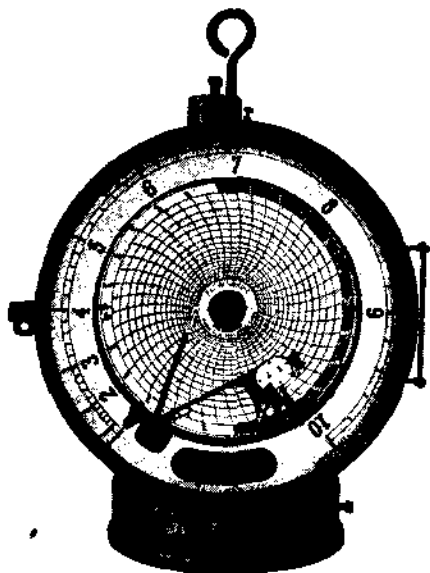
Паропровод. Пар от новых котлов по ответвлениям диам. 178 *mm* подводится к магистрали диам. 229 *mm*, подвешенной на кронштейнах на стене котельной и соединенной компенсатором со старым паропроводом станции. Каждое ответвление помимо главного вентиля имеет вентиль в месте примыкания к магистрали. Имеется вспомогательный паропровод диам. 63 *mm*, подводящий пар к поршневому питательному насосу. Фланцы на главном паропроводе клепаные, на вспомогательном — развальцованные. Паропровод изолирован асбеститом и обтянут тканью, фланцы защищены особыми манжетами. Паропроводу дан небольшой уклон в одну сторону, и в нижней точке его к нему присоединен конденсационный горшок. Второй горшок установлен на магистрали вспомогательного пара перед питательным насосом.

Питание. Для питания новых котлов устроен сзади старых котлов под полом котельной кирпичный бассейн емкостью 12 м^3 . Этот бассейн соединен трубой со старым бассейном, получающим воду от главных насосов станции, и составляет с ним как бы одно целое. Кроме того, в новый бассейн сделан отросток непосредственно от главных насосов станции, подающих воду с реки для конденсации. На железобетонном перекрытии этого колодца установлены два питательных агрегата. № 1—электронасос, имеющий десять ступеней давления, выполненный в виде двух отдельных насосов с электромотором в 34 HP между ними,—производительность его 500 литров/мин. , № 2—вертикальный поршневой одноцилиндровый насос системы Weig'a, производительностью также 500 литров/мин. Оба эти насоса могут работать на любую из двух питательных магистралей 102 мм , из которых одна подает воду в экономайзеры, а другая—непосредственно холодную к котлам. Кроме того, новые магистрали соединяются со старыми, благодаря чему любой питательный агрегат станции может работать на любой из четырех котлов.

Для учета воды, потребляемой новыми котлами, на обеих питательных магистралях будут установлены водомеры Gen. El. Co.

(Фиг. 4), интегрирующие и регистрирующие общее количество воды на бумажных дисках. Учет воды в связи с учетом по весу топлива дает основные данные для суждения о степени экономичности новой установки. Для наблюдения за работой котлов в нужных местах оставлены отверстия для газоанализаторов, пирометров и тягометров. На водопроводах и паропроводах установлены термометры.

Общее понятие о новой установке дает фиг. 5, из которой видно, что существующее помещение является для установки новых котлов довольно тесным. Правда, основные операции: очистка и вывозка золы из топок, чистка и вынимание из котлов труб и



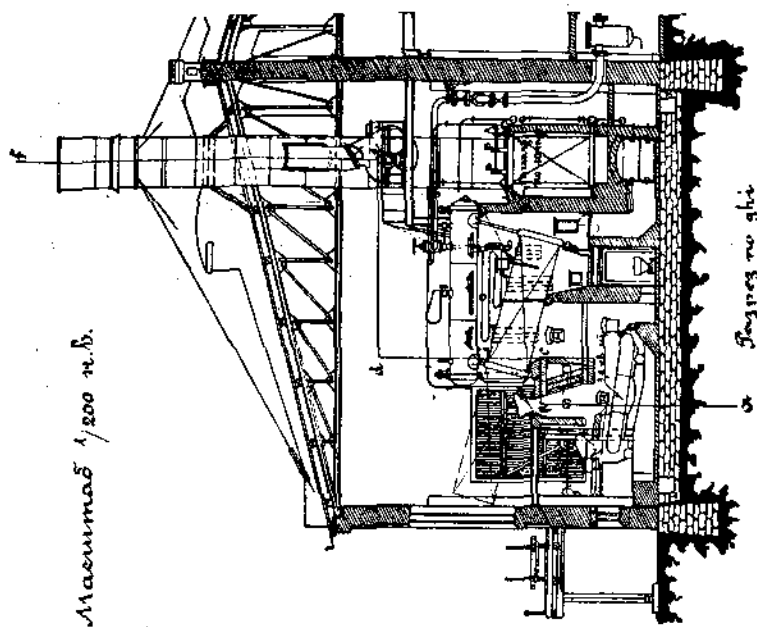
Фиг. 4.

проч. не стеснены, но, например, проходы между новыми и старыми котлами, вывозка золы от старых котлов и доступ к топочным моторам новых котлов оставляют желать очень многого в смысле простора. Что же касается компактности новых котлов по сравнению со старыми в смысле использования площади котельной, то у новых котлов на каждый кв. метр занятой ими площади котельной приходится $7,5 \text{ м}^2$ поверхности нагрева; у старых же котлов — $5,5 \text{ м}^2$.

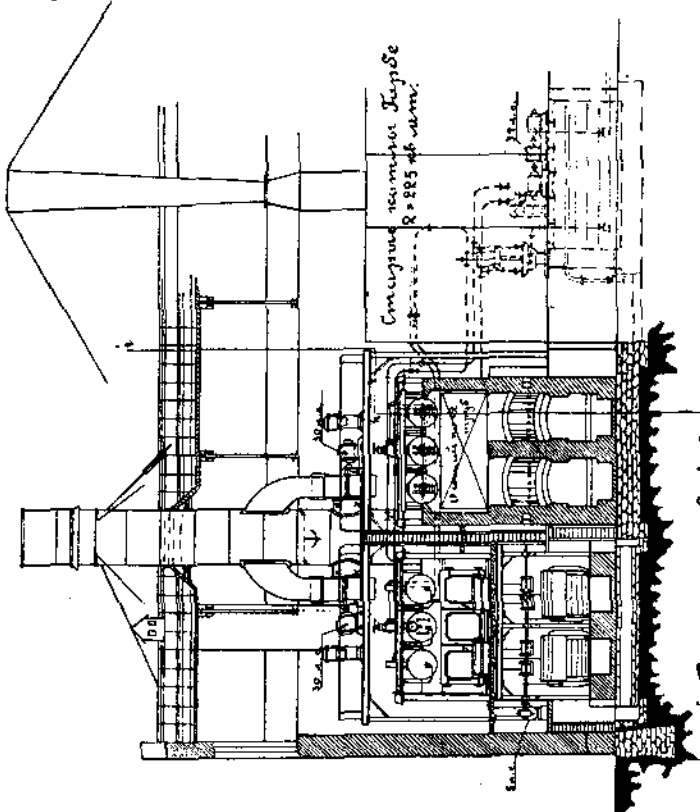
Перспективы работы и развития котельной. С установкой новых котлов и последующей установкой нового мощного турбогенератора закончится первое расширение станции. Когда потребуется другое — сказать трудно. Во всяком случае ускорить процесс дальнейшего развития станции должны два фактора: развитие порта и начало электрификации лесопильных заводов Архангельского района. Что же касается топлива, которое должно окончательно утвердиться в котельной, то это должны быть или отбросы лесопильного производства, или торф, или то и другое вместе. В пользу первого говорит его большая дешевизна, как отброса производства, и возможность получать его с собственного лесопильного завода и с других заводов, к которым проложены уже трамвайные пути (фиг. 1). В настоящее время станция связана трамвайными линиями с двумя большими заводами. В пользу второго говорят мощные залежи торфа, подходящие вплотную к городу и очень близко к станции (фиг. 1). Торфяные болота занимают площадь около 30 км^2 , при средней глубине залегания торфа в 3 м , и смогут дать запас торфа, которого хватит для городской электростанции на 140 лет. Анализы торфа дали вполне удовлетворительные результаты.¹ Реализация этих запасов торфа тем более желательна, что при разработке торфа вместе с тем осушается новая площадь для застройки города, а также и существующая ныне территория города, которая, собственно говоря, представляет собою болото. Благодаря своей близости к центральной электростанции, торф может быть очень удобно транспортируем к топкам котлов; что же касается особенностей торфодобыывания, то добыывание торфа в течение 3-х лет показало полную его возможность в условиях архангельского климата и дало большой опыт в отношении изучения особенностей его по сравнению с центральными районами.

¹ Инж. Ф. А. Дид. Ближайшие задачи Архангельского Городского Самоуправления. Арх. 1919.

Машина № 1/200 н.б.



Разрез по г/и



Смещение парового клапана R=285 мм.

Разрез по а/б/в/г

Фиг. 5.

Не исключается возможность использования для нужд Архангельского района и белого угля, запасы которого находятся довольно близко от города. В 30 *км* от Архангельска находится система реки Лаи, которая может дать до 2500 *кВт*¹.

Но вряд ли можно рассчитывать в скором времени на возможность осуществления постройки Лайской станции по чисто финансовым соображениям, не говоря уже о том, что и существующая станция, при переходе ее на рейки и торф, должна дать достаточно рациональное и экономическое решение вопроса.



¹ Инж. Ф. А. Диц. Бассейн р. Лай. Арх. 1923.