

И. Д. МИХЕЛЬМАН

**ЗНАЧЕНИЕ ТУРБИН  
С ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДО-  
ВАТЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ ПАРА И  
ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИХ  
ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА**

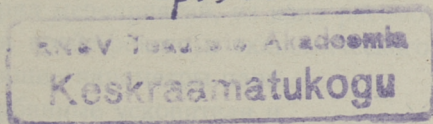
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957



И. Д. МИХЕЛЬМАН

ЗНАЧЕНИЕ ТУРБИН  
С ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДО-  
ВАТЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ ПАРА И  
ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИХ  
ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Ер. 955



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957







## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании турбо-зубчатых агрегатов кораблей ВМФ необходимо обеспечить высокий к. п. д. турбин как при полном так и при уменьшенных ходах корабля. Эти требования обусловлены следующими причинами:

1. При полном ходе корабля часовой расход топлива на его установку получается очень большой. Чтобы увеличить дальность плавания корабля полным ходом, необходимо снизить часовой расход топлива при полном ходе. Поэтому обычно корабельные турбины проектируются так, чтобы при полном ходе получался их высокий к. п. д.

2. Однако, даже при высоком к. п. д. турбин дальность плавания корабля полным ходом невелика, ибо мощность главного двигателя изменяется пропорционально кубу скорости корабля, отчего расход топлива на милю пути, пройденного кораблём, с увеличением его скорости растёт и соответственно дальность плавания корабля уменьшается. Поэтому полный ход корабля развивают только в специальных случаях: при испытаниях, в условиях боя, при выполнении специальных заданий и т. п.

Согласно данным, приведенным в иностранной литературе \*, чтобы увеличить дальность плавания, корабли около 99% всего ходового времени идут уменьшенным ходом. Поэтому повышение к. п. д. корабельных турбин на уменьшенных ходах имеет особенно важное значение. Чтобы повысить к. п. д. турбины при уменьшенных ходах, применяют ряд мероприятий, из коих рассмотрим четыре:

- 1) ступени крейсерского и экономического хода,
- 2) скользящие параметры пара,
- 3) газотурбинные ускорители и
- 4) параллельно-последовательный поток пара.

---

\* См. Сборник рефератов по иностранному судостроению № 16 за 1955 г., стр. 55.

# 1. СРАВНЕНИЕ ЧЕТЫРЁХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПАРОВЫХ ТУРБО-ЗУБЧАТЫХ АГРЕГАТОВ НА УМЕНЬШЕННЫХ ХОДАХ

Для повышения к. п. д. турбо-зубчатых агрегатов на уменьшенных ходах исторически первым был применён метод включения ступеней крейсерского и экономического хода. При этом методе с помощью обводных клапанов при крейсерском ходе включаются ступени крейсерского хода, перерабатывающие часть перепада давлений  $A' B'$  (рис. 1), а при экономическом ходе кроме того включаются ещё и ступени экономического хода, которые вместе со ступенями крейсерского хода перерабатывают часть перепада давлений  $A'', B''$ , приходящегося на регулировочную ступень. В результате на регулировочную ступень и на каждую из ступеней крейсерского и экономического хода приходится малый перепад давлений, в них получаются малые скорости выхода пара из сопел  $C_1$ , а отношение  $\frac{U}{C_1}$  и соответственно к. п. д. регулировочной

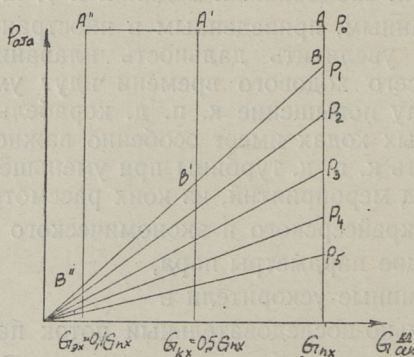


Рис. 1. Зависимость давлений в ступенях от расхода пара при сопловом регулировании турбины



ступени и ступеней уменьшённых ходов получают сравнительно более высокие, чем у регулировочной ступени при отсутствии ступеней крейсерского и экономического хода. Основной недостаток этого метода заключается в том, что при расположении ступеней уменьшённых ходов в корпусе ТВД при полном ходе они вращаются в среде пара высокого давления, обуславливая повышенные вентиляционные потери, снижающие к. п. д. турбины.

Чтобы устранить этот недостаток, был предложен ряд мероприятий. Одним из них было вынесение ступеней уменьшённых ходов в отдельный корпус, называемый маршевой турбиной. При полном ходе маршевая турбина либо отключалась с помощью гидравлической или электромагнитной муфты, либо корпус её сообщался с конденсатором, так что ротор её вращался в среде пара низкого давления. В обоих вариантах применение маршевой турбины увеличивало габариты и вес агрегата и усложняло маневрирование. Эти недостатки установки со ступенями крейсерского и экономического хода обусловили появление ряда других методов повышения экономичности турбин на уменьшенных ходах. Следует отметить, что сравнение турбины со ступенями крейсерского и экономического хода с другими типами её следует проводить отдельно в двух интервалах мощностей турбины:

1-й — в интервале от полного до крейсерского хода и  
2-й — в интервале от крейсерского до экономического хода включительно.

В первом интервале мощностей мероприятия, повышающие к. п. д. турбины, заменяют ступени крейсерского хода, а во втором — ступени экономического хода.

В первом интервале мощностей наиболее рациональными являются два мероприятия: скользящие параметры пара и газо-турбинные ускорители.

За расчётный режим для паровой турбины в этих двух случаях выгодно принять режим крейсерского хода. В установке со скользящими параметрами пара можно принять например:  $t_{o_{кх}} = 450^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{o_{кх}} = 35 \text{ ата}$  и  $P_{x_{кх}} = 0,08 \text{ ата}$ .

При полном ходе установка работает при повышенных параметрах пара, например при  $P_{o_{пх}} = 70 \text{ ата}$ ,  $t_{o_{пх}} = 550^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{x_{пх}} = 0,16 \text{ ата}$ . Если принять  $G_{кх} = 0,5 G_{пх}$ , то при



$$\frac{P_{о кх}}{P_{о пх}} = \frac{P_{х кх}}{P_{х пх}} = 0,5$$

скорости истечения пара из сопел всех ступеней ( $C_1$ ) получаются при обоих режимах одинаковые, а число оборотов при переходе с крейсерского на полный ход увеличивается в  $\sqrt[3]{2} = 1,26$  раз и соответственно в 1,26 раз увеличится и отношение  $\frac{U}{C_1}$  во всех ступенях.

Чтобы обеспечить получение высокого к. п. д. турбины во всём интервале мощностей от крейсерского до полного хода, необходимо отношение  $\frac{U}{C_1}$  выбрать при крейсерском ходе меньше и при полном ходе больше, чем наилучшее отношение на одну и ту же величину.

Преимущество турбины со скользящими параметрами пара перед турбиной со ступенями крейсерского хода заключается в том, что при полном ходе её к. п. д. получается более высокий по двум причинам:

- 1) вследствие применения высоких начальных параметров пара,
- 2) вследствие отсутствия вентиляционных потерь, обусловленных холостым вращением ступеней крейсерского хода при полном ходе корабля.

Применение высоких параметров пара при полном ходе корабля не вызывает быстрого износа турбины, так как полным ходом корабля идут лишь около 1% от общего годового времени.\*

Но в интервале мощностей от крейсерского до экономического хода включительно применение скользящих параметров пара по мере уменьшения мощности турбины становится всё менее выгодным и при экономическом ходе не обуславливает повышение к. п. д. турбины. Например, если изменить давление пара прямо пропорционально расходу его, то при экономическом ходе получим при  $G_{э\kappa} = 0,1G_{пх}$ ,  $P_{о\kappa} = 0,1P_{о пх} = 7$  ата и  $P_{х\kappa} = 0,1P_{х пх} = 0,016$  ата.

При  $P_{о\kappa} = 0,1P_{о пх}$  к. п. д. теоретического цикла паросиловой установки получается очень низкий и давление в

\* См. Сборник рефератов по иностранному судостроению № 16, 1955 г., стр. 55.

конденсаторе  $P_{x_{эк}} = 0,016$  значительно ниже наивыгоднейшего давления в конденсаторе, составляющего около

$$P_{x_{наив.}} = 0,04 + 0,05 \text{ ата.}$$

В интервале мощностей от полного до крейсерского хода более рационально, чем скользящие параметры пара, применять другой способ повышения к. п. д. турбо-зубчатого агрегата при уменьшённых ходах корабля, а именно комбинированную установку, состоящую из паровой турбины, рассчитанной на мощность крейсерского хода и газотурбинного ускорителя, включаемого при полном ходе.\* Достоинства такой установки заключаются в следующем:

1. При крейсерском ходе паровая турбина работает при расчётном режиме с высоким к. п. д., при полном ходе расход пара через турбину не меняется и к. п. д. её получается снова высокий, газовая турбина также имеет высокий к. п. д., её удельный расход топлива составляет

$$b_e = 0,3 \text{ кг/л. с. час.}$$

Следовательно, комбинированная установка сохраняет высокий к. п. д. в интервале мощностей от полного до крейсерского хода.

2. В качестве газотурбинных ускорителей применяют авиационные газотурбинные установки, имеющие удельный вес  $q = 0,9$  кг/л. с., который значительно меньше, чем у паросиловых установок, имеющих удельный вес порядка  $q = 10—12$  кг/л. с. В результате вес комбинированной установки получается почти в два раза меньше, чем паросиловой установки.

Недостатком газотурбинного ускорителя является его малый срок службы, составляющий около 500 часов. Однако, в комбинированной установке этот недостаток не имеет практического значения. Если принять срок службы паросиловой установки 50 000 часов и газотурбинного ускорителя 500 часов и учесть, что последний работает всего лишь в течение 1% от общего ходового времени, то износ паросиловой установки и газотурбинного ускорителя наступает одновременно. Но в интервале мощностей крейсерского и экономического хода подобные установки не применимы из-за быстрого износа, ибо этими ходами корабль идёт около 99% всего ходового времени.

---

\* См. Сборник рефератов по иностранному судостроению № 16, 1955 г., стр. 55.



Из рассматриваемых четырёх способов повышения экономичности турбо-зубчатых агрегатов при уменьшённых скоростях корабля, в интервале от крейсерского до экономического хода, могут применяться только лишь два типа турбин:

1-й — турбины со ступенями экономического хода и  
2-й — турбины с параллельно-последовательным потоком пара.

При этом в турбине со ступенями экономического хода при полном и при крейсерском ходе эти ступени вращаются вхолостую, снижая к. п. д. турбины, а в турбине с параллельно-последовательным потоком пара нет вращающихся вхолостую ступеней.\*

Из вышеприведенного анализа можно прийти к заключению о выгодности применения комбинированной турбины, у которой в интервале мощностей от полного до крейсерского хода применяют либо скользящие параметры пара, либо газотурбинные ускорители, а в интервале мощностей от крейсерского до экономического хода применён параллельно-последовательный поток пара.

Такое усложнение установки на первый взгляд может вызвать опасение снижения маневренности установки. Однако все существующие типы турбин при ручном управлении маховиками каждого клапана не удовлетворяют требованиям маневренности при современных условиях, при наличии морской авиации, быстроходных кораблей, управляемых и самонаводящихся снарядов и т. п.

Чтобы обеспечить требуемую маневренность, необходимо ввести дистанционное управление всеми клапанами с помощью одного маховика с поста управления или с мостика. При дистанционном управлении легко обеспечить требуемую последовательность перекрытия клапанов вращением одного маховика и опасение ухудшения маневренности из-за усложнения установки отпадает. Такое управление широко применяется в современных корабельных установках.

Примечание: В интервале мощностей от полного до экономического хода применение параллельно-последовательного потока пара не дает значительного повышения к. п. д. установки, так как при изменении режима получаются значительные углы атаки при входе пара на лопатки, обуславливающие большие потери. Чем

---

\* Описание турбины с параллельно-последовательным потоком пара см. стр. 9—11.



меньше интервал мощностей, тем меньше углы атаки получаются при переходе с параллельного на последовательный поток. Поэтому в интервале от крейсерского до экономического хода применение параллельно-последовательного потока пара рентабельнее, чем в интервале от полного до экономического хода.

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ТУРБИНЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ ПАРА

В существующих установках с параллельно-последовательным потоком пара при полном ходе в турбине осуществляется параллельный поток пара, а при уменьшенных ходах — последовательный.

Следует отметить, что разделение потока пара в части высокого давления на два параллельных потока приводит к уменьшению степени впуска пара в них. Поэтому турбины с параллельно-последовательным потоком пара рентабельно применять только при большой мощности агрегата.

Ступени параллельно-последовательного потока пара могут размещаться либо в одном корпусе ТВД (рис. 2), либо в двух корпусах (рис. 3 и 4).

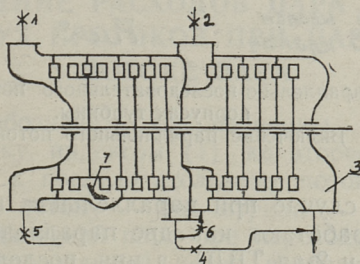


Рис. 2. Схема ТВД с параллельно-последовательным потоком пара

В первом случае (рис. 2) при параллельном потоке пар из котла поступает через клапаны 1 и 2 одновременно в оба потока. Отработанный пар из первого потока при закрытом клапане 6 и открытом клапане 4 смешивается с паром второго потока, выходящим из патрубка 3 и, соединившись с ним, направляется в ТНД. При

последовательном потоке пар поступает в первый проток через клапан 5. Перегородка 7 служит для обвода второго венца рабочих лопаток регулировочной ступени. Отработавший в первом протоке пар при закрытом клапане 4 и открытом клапане 6 направляется во второй проток и затем через патрубок 3 направляется в ТНД.

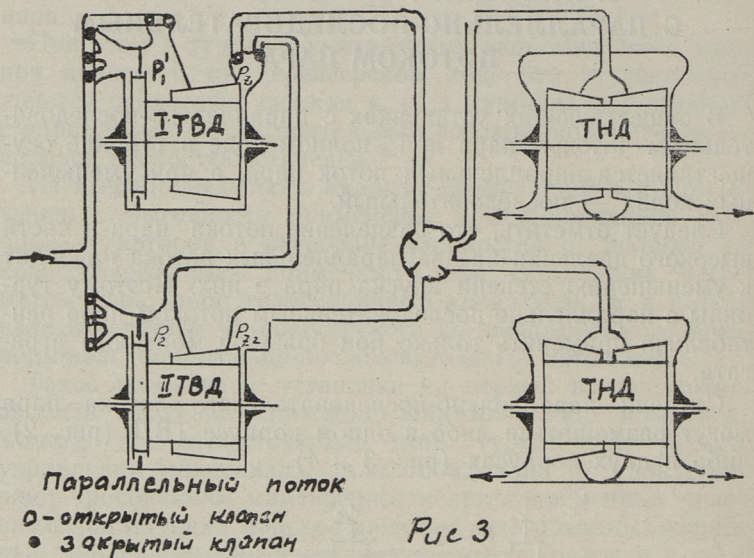
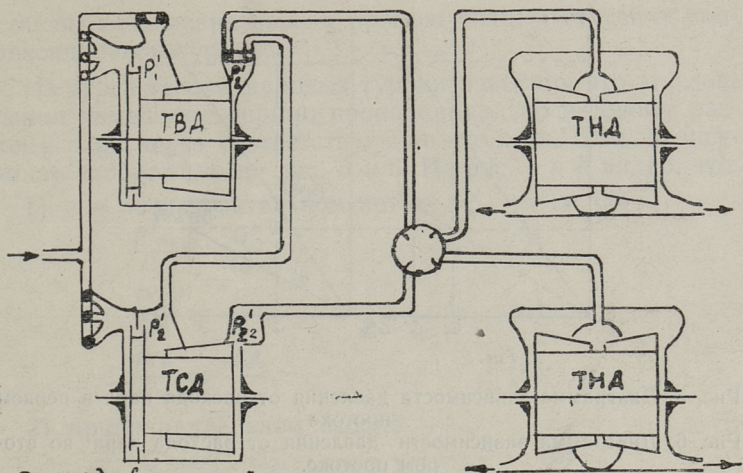


Рис. 3. Схема параллельно-последовательного потока пара в двух корпусах турбины.  
Включение параллельного потока

Во втором случае при параллельном потоке (рис. 3) оба корпуса работают как две параллельно включенные ТВД (I ТВД и 2-ая ТВД), а при последовательном потоке (рис. 4) как ТВД и ТСД.

Различие конструкций не влияет на метод определения давления и весовых расходов пара в турбине с параллельно-последовательным потоком пара. Оно отражается лишь на распределении мощностей и теплоперепадов по корпусам при режиме полного хода, т. е. при параллельном потоке, в результате которого определяется давление смеси пара ( $P_{z1} = P_{z2} = P_z$ ), направляющейся из обоих потоков в ТНД.





Последовательный поток

○ - открытый клапан

● - закрытый клапан

Рис. 4

Рис. 4. Схема параллельно-последовательного потока пара в двух корпусах турбины.  
Включение последовательного потока

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ПАРА ЧЕРЕЗ КАЖДЫЙ ИЗ ДВУХ ПРОТОКОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ПОТОКЕ ПАРА

Условимся обозначать все величины, относящиеся к первому потоку, индексом (1), ко второму потоку — индексом (2), к последовательному потоку штрихом и параллельному потоку — без штриха.

Изменения давлений пара при переходе с параллельного на последовательный поток изображены для первого протока на рис. 5, а для второго — на рис. 6.

При расчете турбины с параллельно-последовательным потоком пара заданы следующие величины:

1. Весовые расходы пара при двух режимах

$G$  и  $G^1$  кг/сек.

2. Давление пара перед  $P_{01} = P_{02} = P_0$  и за обоими потоками  $P_{z1} = P_{z2} = P_z$  при параллельном потоке пара.

Требуется определить весовые расходы пара при па-



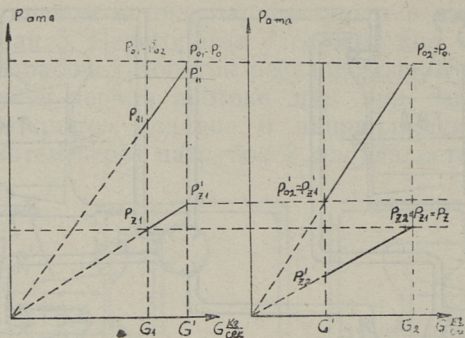


Рис. 5

Рис. 6

Рис. 5. Диаграмма зависимости давления от расхода пара в первом протоке

Рис. 6. Диаграмма зависимости давления от расхода пара во втором протоке.

параллельном потоке пара через первый проток  $G_1$ , через второй проток  $G_2$  и давление пара при последовательном потоке за первым  $P_{z1}^1$  и за вторым протоком  $P_{z2}^1$ .

Кроме того необходимо уточнить давление пара перед турбиной при последовательном потоке ( $P'_{01}$ ) и за регулировочной ступенью первого протока  $P_{11}$  и  $P'_{11}$  при двух режимах.

Скорость пара в трубопроводе изменяется прямо пропорционально весовому расходу пара, если пренебречь изменением его удельного объема, то

$$\frac{C^1}{C} = \frac{G^1}{G} \dots \dots \dots (A)$$

Потеря в трубопроводе изменяется прямо пропорционально квадрату скорости

$$\frac{\Delta h^1}{\Delta h} = \left(\frac{C^1}{C}\right)^2 = \left(\frac{G^1}{G}\right)^2 \dots \dots \dots (B)$$

Вследствие уменьшения потерь в трубопроводе давление пара перед турбиной при последовательном потоке получается больше, чем при параллельном и может быть определено по «IS» диаграмме.

Однако, в приближенных расчётах часто пренебрегают этой поправкой и принимают  $P'_{01} = P_{01} = P_{02} = P_0$ .

Все остальные давления пара в обоих протоках  $P$  пред-

ставляют давление пара в промежуточных ступенях конденсационной турбины.

Из курса теории паровых турбин известно, что эти давления изменяются прямо пропорционально весовому расходу пара через соответствующие ступени. Эта зависимость изображена на рис. 5 и 6. Из рис. 5 и 6 видно, что:

1) при последовательном потоке  $P'_{z_1} = P'_{o_2}$ . (1)

$$\frac{P'_{o_2}}{P_{o_2}} = \frac{G'}{G_2}, \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{P'_{z_1}}{P_{z_1}} = \frac{G'}{G_1}, \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{P'_{z_2}}{P_{z_2}} = \frac{G'}{G_2}, \dots \dots \dots (4)$$

2) при параллельном потоке

$$G = G_1 + G_2, \dots \dots \dots (5)$$

$$P_{z_1} = P_{z_2} = P_z \dots \dots \dots (6)$$

Система уравнений (1, 2, 3, 4, 5) содержит пять неизвестных величин ( $P'_{o_2}; P'_{z_2}; P'_{z_1}; G_1$  и  $G_2$ ), которые легко могут быть определены.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБИНЫ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ПОТОКЕ ПАРА

При расчёте турбин с параллельно-последовательным потоком пара следует выяснить ещё два вопроса:

- 1) условия работы регулировочной ступени первого протока при двух режимах и
- 2) распределение теплоперепадов по корпусам при режиме полного хода.

При уменьшённом ходе, т. е. при последовательном потоке число оборотов ротора и окружная скорость лопаток получается меньше, чем при полном ходе и параллельном потоке пара. Чтобы избежать резкого изменения отношений  $\nu = \frac{U}{C_1}$ , рентабельно получить при последовательном потоке меньший теплоперепад в регулировочной ступени, чем при параллельном потоке, для чего необходимо выбрать соответственно



$$G_1 < G' \dots \dots \dots (Д)$$

Чтобы вход пара на рабочие лопатки при двух режимах получился безударным, впуск пара в регулировочную ступень первого протока необходимо осуществлять при каждом режиме через свою группу сопел с соответствующим углом выхода пара из них  $\alpha_1$  определяемым из построения входного треугольника при заданном угле  $\beta_1$  входа пара на рабочие лопатки.

Если  $G_1$  значительно меньше, чем  $G'$ , то при последовательном потоке теплоперепад в регулировочной ступени может оказаться очень малым и отношение скоростей  $\frac{U}{C_1}$  значительно бóльшим, чем при параллельном потоке. В этом случае рентабельно при параллельном потоке применить в регулировочной ступени первого протока двухвенечную ступень, а при последовательном потоке одновенечную, обводя второй венец, как это изображено на рис. 2.

Выбор давления пара за соплами регулировочной ступени при параллельном потоке определяет выбор типа этих сопел. При выборе суживающихся сопел можно принять:

- а) если желательно, чтобы пар не расширялся в косом срезе сопел, то давление за соплами критическое, т. е.

$$P_{11} = 0,546 P_{01},$$

- б) если допустить небольшое расширение пара в косом срезе сопел, то

$$P_{11} = 0,8 \cdot 0,546 \cdot P_{01}.$$

При последовательном потоке  $P'_{11} = P_{11} \frac{G'}{G_1} \dots \dots \dots (3)$

Давление пара при выходе из обоих протоков при параллельном потоке  $P_{z_1} = P_{z_2} = P_z$  определяется при распределении мощности и теплоперепадов по корпусам. Например, рассмотрим двухкорпусную турбину, в которой оба протока расположены в ТВД.

Распределение эффективной мощности по корпусам производим из отношения:

$$Ne^B : Ne^H = 1 : \beta \dots \dots \dots (E)$$



Принимая механический к. п. д. и расход пара в обоих корпусах одинаковым, получим:

$$H_i^B : H_i^H = 1 : \beta \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (F)$$

Внутренний теплоперепад в турбине

$$H_i = H_a \eta_{oi} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (G)$$

Внутренний теплоперепад в ТВД

$$H_i^B = \frac{H_i}{1+\beta} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (I)$$

Внутренний к. п. д. ТВД

$$\eta_{oi}^B = \alpha \cdot \eta_{oi} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (K)$$

Величины  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются по данным практики порядка  $\alpha=0,95$  и  $\beta=1,2$  или по прототипу.

Адиабатический теплоперепад в ТВД.

$$H_a^B = \frac{H_i^B}{\eta_{oi}^B} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (L)$$

Отложив адиабатический теплоперепад в ТВД ( $H_a^B$ ) на «IS» диаграмме, получим давление пара  $P_{z_1}=P_{z_2}=P_z$  при выходе из ТВД при параллельном потоке пара. Аналогичным путём можно определить значение  $P_z$  и при иной конструкции турбин.

И. Д. Михельман  
ЗНАЧЕНИЕ ТУРВИН С ПАРАЛЛЕЛЬНО-  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ ПАРА И  
ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИХ ТЕПЛООВОГО  
РАСЧЕТА

Издательство  
Таллинского Политехнического Института

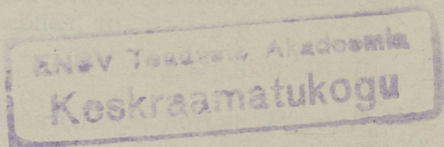
\*

Редактор Н. Я с у л о в и ч  
Технический редактор А. Т а м м  
Корректор П. А н с о н

Сдано в набор 2 VII 1957. Подписано к печати  
28 VII 1957. Бумага 54×84, 1/4. Печатных ли-  
стов 1,0. По формату 60×92 печатных листов  
0,82. Учетно-издательских листов 0,71. Ти-  
раж 800. МВ-06079. Заказ № 2261.

Типография «Юхисэлу», Таллин,  
ул. Пикк 40/42.

Цена 50 коп.







50 коп.