

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

70-72

WARSZAWA-POZNAŃ 1976
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY – EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER – REDAKTOR – EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN.
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1976

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

Wydanie I. Nakład 630+90 egz. Ark. wyd. 63,25 Ark. druk. 49,25 Papier druk.
sat. kl. V. 65 g., 70×100. Oddano do składania 4 VII 1975 r. Podpisano do druku
w czerwcu 1976 r. Druk ukończono w czerwcu 1976 r. Zam. 528/118. H-16/245.
Cena zł 190,–

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

III KONFERENCJA NAUKOWA

na temat

TURBINY PAROWE WIELKIEJ MOCY

Gdańsk, 24 - 27 września 1974 r.

*

IIIrd SCIENTIFIC CONFERENCE

on

STEAM TURBINES OF GREAT OUTPUT

Gdańsk, September 24 - 27, 1974

*

III НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

на тему

ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Гданьск, 24 - 27 сентября 1974 г.

НИКОЛАЙ ЕРМАШОВ, ЮРИЙ МАРЧЕНКО

СССР*

Аэродинамическая отработка периферийного меридионального обвода в цилиндре низкого давления

При расширении пара в цилиндре низкого давления происходит интенсивное увеличение его удельного объема, при этом максимальное нарастание происходит в конце процесса расширения. Например в цилиндре низкого давления турбины К-300-240 ЛМЗ, объем на выходе из турбины увеличивается в 25 раз по сравнению с объемом на входе в цилиндр низкого давления. Если перепад тепла в цилиндре низкого давления распределить между ступенями поровну и принять одинаковые углы выхода потока из лопаток, то длина рабочей лопатки последней ступени должна быть в 8,5 раз больше первой. Такое соотношение обычно не требуется выдерживать, потому что тепловые перепады на ступень и углы выхода потока принимаются с возрастанием от первой ступени к последней. При этом в последней ступени скорости, как правило, сверхзвуковые, а в предшествующих — дозвуковые. Тем не менее, быстрое нарастание объемного расхода пара к концу процесса расширения приводит к резкому увеличению проходных сечений проточной части, а следовательно и длины рабочих лопаток.

Известно, что наиболее высокая экономичность цилиндра получается при плавном очертании проточной части, при сравнительно небольшом угле раскрытия, когда концевые потери в ступенях минимальные.

Для обеспечения плавного очертания проточной части в меридиональной плоскости в этом случае требуется принимать расстояние между отдельными ступенями и даже отдельными венцами довольно большими. Это приводит к увеличению длины турбины, что удорожает ее стоимость, а в отдельных случаях, когда число ступеней в цилиндре низкого давления больше пяти, значительно усложняет конструктивное исполнение ротора. Поэтому в современных мощных паровых турбинах ступени устанавливаются на сравнительно небольшом расстоянии друг от друга, а это приводит к резкому увеличению угла раскрытия проточной части в меридиональной плоскости. Особенно резкий переход наблюдается между предпоследней и последней ступенью, где угол в меридиональной плоскости в некоторых слу-

* Центральный котлотурбинный институт им. И. И. Ползунова, Ленинград.

чаях превышает 60° . Переходный участок в этом месте представляет собой диффузор с большим углом раскрытия, поэтому течение на этом участке часто сопровождается отрывом потока от ограничивающих стенок, а это приводит к дополнительным потерям и снижению экономичности турбины.

В современных мощных паровых турбинах наружная ограничивающая поверхность выполняется различной конфигурации.

На экспериментальной турбине ЦКТИ исследовалась эффективность нескольких вариантов форм меридионального обвода на периферии направляющего аппарата последней ступени. Проточная часть исследованного отсека показана на рис. 1, варианты форм меридиональных обводов — на рис. 2.

Вариант I — исходный — (рис. 2). Входной участок у него конический, угол наклона образующей конуса равен 58° , перед выходными кромками направляющих лопаток — угол образующей равен 30° .

В средней части эти конические поверхности сопряжены поверхностью тора радиусом $R=2b$ (b — хорда направляющей лопатки в периферийном сечении). За выходными кромками — коническая поверхность с углом конуса — 60° .

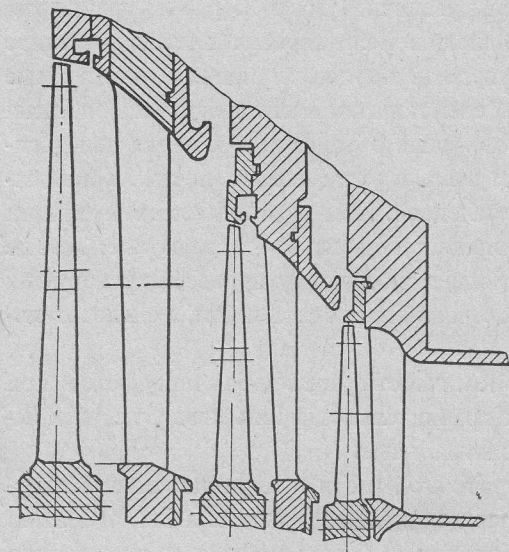


Рис. 1. Проточная часть отсека ЦНД

Вариант II отличается большим углом на входном участке (он равен 65°) и меньшим перед выходными кромками направляющих лопаток (он равен 20°). Сопряжение входного и выходного участков произведено тем же радиусом.

Вариант III — на всех участках до выходных кромок выполнен коническим с углом конуса, равным 45° .

При конструировании различных вариантов выдерживалось условие постоянства периферийного диаметра на выходных кромках лопаток и входного диаметра

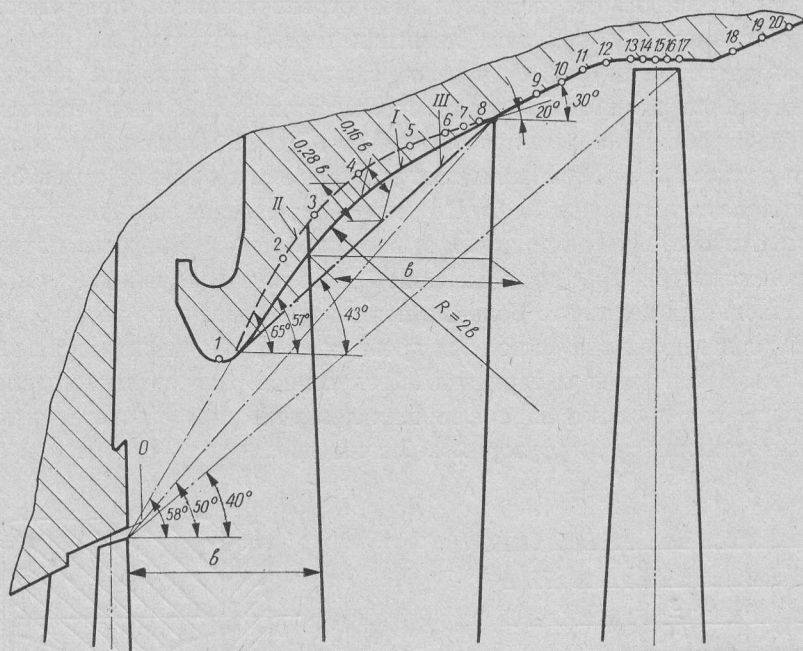


Рис. 2. Формы меридионального обвода в направляющем аппарате последней ступени

в диафрагму, что позволило обеспечить расчетную площадь на выходе из направляющих лопаток.

Минимальное затенение проходной площади в направляющих лопатках, как это видно из рис. 2, имеется в варианте II, максимальное — в варианте III.

Изменение локального угла наклона периферийного обвода на последней ступени при различных формах меридионального обвода показано на рис. 3. Из него следует, что наибольшее изменение угла наклона имеется во II варианте, в котором угол наклона на участках 5÷8 оказывается даже меньше, чем на выходном участке 8÷12.

Для выполнения таких форм меридионального обвода была разработана специальная конструкция диафрагмы со сменными промежуточными телами на вершине лопаток (рис. 4). Эти промтела плотно пригонялись к лопаткам (с зазором не более 0,05 мм) и крепились в диафрагме входными и выходными козырьками.

Для анализа привлекались данные по отбору статического давления на периферии последней ступени. В каждом варианте проводилось дренирование двух каналов по средней их линии. Дренаж осуществлялся на всей периферийной поверхности диафрагмы (рис. 5), что позволило изучить влияние формы меридионального обвода на поведение потока в периферийной части в пределах всей ступени.

При этом следует иметь ввиду, что возможное изменение экономичности ступени сопровождается изменением параметров потока, которое происходит вследствие изменения формы линий тока.

Результаты дренирования периферийной ограничивающей поверхности ступени при постоянном номинальном давлении перед ступенью на номинальных оборотах ротора показали (рис. 6), что во всех вариантах давление на ограничивающей поверхности входного козырька оказывается $b \approx 1,25$ раза больше давления на выходе из рабочего колеса предыдущей ступени. Повышение давления происходит почти одинаково во всех вариантах и заканчивается только при входе в направляющие лопатки. В вариантах I и II повышение давления заканчивается в точке 3; затем остается постоянным до точки 5, после которой расширение потока в варианте I происходит быстрее и до меньшего давления. В варианте с коническим обводом наблюдается несколько большее повышение давления в точке 3, затем — резкое расширение, причем на выходных кромках давление оказывается значительно меньше, чем в первых двух вариантах. Полученное распределение давления на входном участке и в пределах направляющих лопаток свидетельствует о том, что входной участок является диффузорным. Значительная часть скоростной энергии

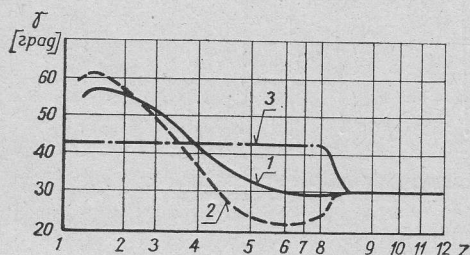


Рис. 3. Изменение угла наклона периферийного обвода к оси турбины для разных вариантов исполнения

1 — вариант I, 2 — вариант II, 3 — вариант III. По оси абсцисс цифрами показаны номера отборов давлений с периферийного обвода

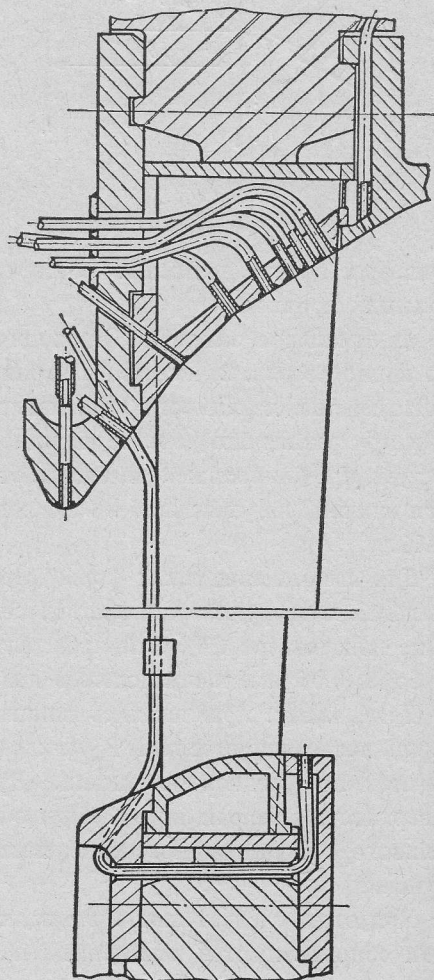


Рис. 4. Диафрагма со сменными вставками меридиональных обводов

потока здесь превращается в давление. Отрыва потока, как это имеет место на оди-
ночных ступенях с такими же углами раскрытия, не наблюдается.

Это объясняется характером потока, выходящего из предыдущей ступени. Как
показывают результаты траверсирования (рис. 7), выходящий из рабочего колеса
предпоследней ступени поток на периферии имеет на номинальном режиме значи-

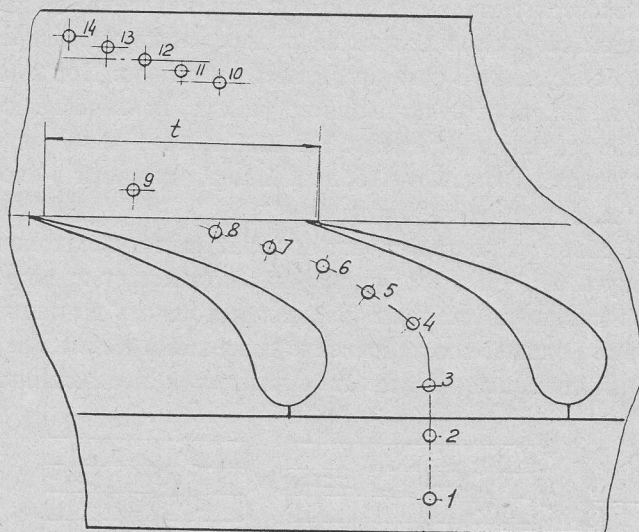


Рис. 5. Расположение отборов давлений по периферийному обводу диафрагмы

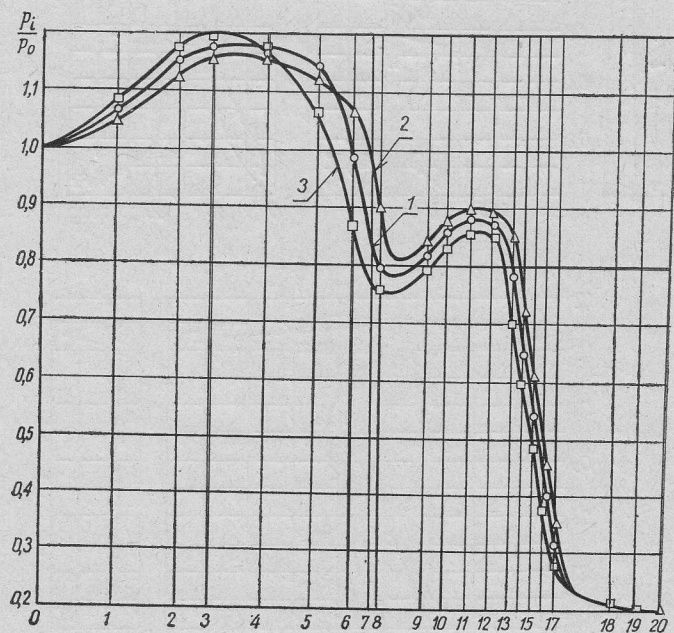


Рис. 6. Распределение давлений по периферийному обводу направляющего аппарата
последней ступени

1 — вариант I меридионального обвода, 2 — вариант II, 3 — вариант III

тельную закрутку (до 40°), повышенные полные параметры, а также большой меридиональный угол (γ свыше 60°). В результате этого поток обтекает периферийный обвод на входном участке без отрыва при любых очертаниях меридионального обвода. Этому же способствует повышенный расход пара через периферийную область (рис. 7).

Полученное в эксперименте на 25% повышение давления на входном участке объясняется большой скоростью потока на периферии предпоследней ступени, которая в том месте более, чем в 3 раза превышает расчетную. При конической форме обвода, имеющей меньший угол на входном участке, повышение давления происходит в большей мере, чем в вариантах I и II. Следовательно, меньший угол конуса на входном участке позволяет в большей мере превратить скоростную энергию в давление, т.е. затормозить поток.

Периферийный обвод за направляющими лопатками имеет коническую поверхность с углом конуса 60° . На этом участке, как показывает дренирование поверхности (рис. 6), происходит восстановление давления вплоть до цилиндрической поверхности (точка 12). Большее восстановление давления имеется в варианте с коническим обводом. Полученный результат оказывается неожиданным, т.к. имею-

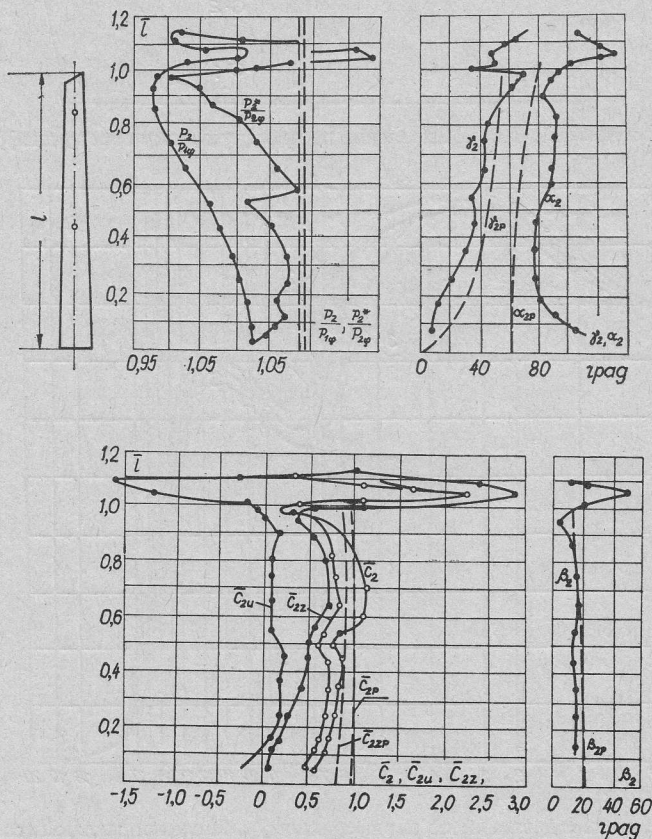


Рис. 7. Распределение газодинамических параметров за предпоследней ступенью

пидеся к настоящему времени данные свидетельствуют о постоянстве давления в межвенцовом зазоре по оси ступени.

Следовательно, выполнение в межвенцовом зазоре конической поверхности приводит к повышению давления. В результате этого поток перед рабочими лопатками оказывается с меньшими по сравнению с расчетными скоростями, что ведет к дополнительным потерям энергии из-за неоптимального угла входа потока на рабочие лопатки.

Расширение на периферийном участке в пределах рабочих лопаток примерно одинаково (рис. 6 на участке от точки 13 до точки 17).

Из полученных эпюр распределения давления по поверхности меридионального обвода видно, что различие в форме меридионального обвода в исследованных вариантах не приводит к существенной деформации потока. Характер распределения давления во всех вариантах оказывается примерно одинаковым. Из эпюр рас-

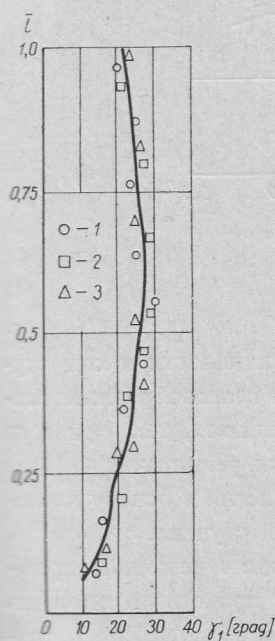


Рис. 8. Распределение углов γ_1 по высоте лопатки за направляющим аппаратом

1 — вариант I, 2 — вариант II, 3 — вариант III

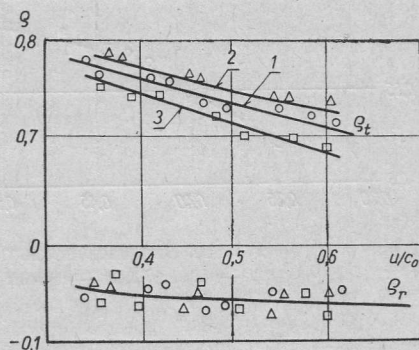


Рис. 9. Распределение реактивности при разных вариантах исполнения меридионального обвода

1 — вариант I, 2 — вариант II, 3 — вариант III

пределения углов выхода потока за направляющими лопатками γ_1 также трудно определить их изменение (рис. 8). Во всех этих вариантах углы γ_1 оказались практически одинаковыми.

Степень реактивности во всех вариантах в корне практически не меняется (рис. 9), на периферии различие имеется, но оно не существенно. Степень реактивности оказалась меньше расчетной, которая на номинальном режиме равна $\rho_r = 3\%$ и $\rho_t = 7\%$ при $u/c'_0 = 0,58$.

Исследования показали, что экономичность последней ступени с различными вариантами меридионального обвода во всем исследованном диапазоне по u/c'_0 оказалась практически неизменной (рис. 10).

Известно, что экономичность ступени в значительной мере определяется правильным согласованием проходных площадей направляющих и рабочих лопаток. В ступенях со сравнительно короткими лопатками проверку согласованности проводят путем изменения проходных площадей на рабочих и направляющих лопатках. Обычно это изменение достигается варьированием угла установки лопаток и диаметров торцевых ограничивающих поверхностей.

Как было установлено, в данной ступени имеется упругий разворот рабочих лопаток, который приводит к увеличению проходной площади на периферии ра-

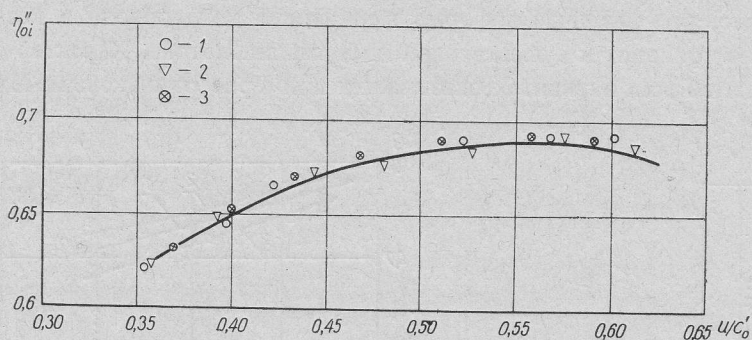


Рис. 10. Экономичность последней ступени
I — вариант I, 2 — вариант II, 3 — вариант III

бочих лопаток. В результате этого уменьшается степень реактивности и кпд ступени. Для повышения эффективности ступени представляется целесообразным несколько увеличить проходную площадь в направляющих лопатках, т.е. привести в соответствие проходные площади направляющих и рабочих решеток.

Это, а также результаты изложенных выше исследований легли в основу последующей отработки форм меридионального обвода последней ступени.

Используя принцип формирования меридионального обвода с помощью пром-вставок, в данной ступени оказалось возможным изменить проходную площадь в направляющем аппарате путем изменения меридионального обвода при сохранении углов установки направляющих лопаток. Изменение площади производилось варьированием периферийного диаметра, при этом несколько изменялась форма меридионального обвода. Исследовались три варианта (рис. 11). Вариант I — исходный, такой же, как и в предыдущей серии.

Вариант IV — с уменьшенной на 4% площадью, при этом форма меридионального обвода близка к конической. Перед рабочими лопатками в этом варианте выполнен уступ, т.е. имеется положительная перекрыша.

Вариант V имеет на 6% увеличенную проходную площадь. На выходе из направляющих лопаток, начиная примерно с горла, выполнен конус с углом 8°, т.е. в осевом зазоре ограничивающая периферийная поверхность близка к цилиндри-

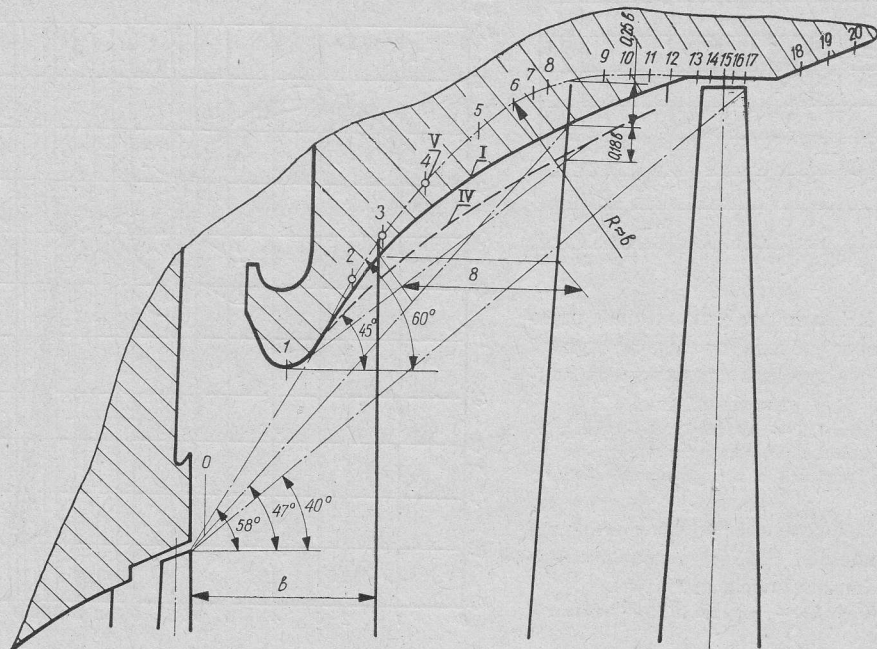


Рис. 11. Формы меридионального обвода в направляющем аппарате последней ступени

ческой и перекрыша отсутствует. Сопряжение входного и выходного участков выполнено радиусом $R \approx b$.

Изменение локального угла наклона периферийного обвода для этих вариантов показано на рис. 12.

При исследовании этих вариантов производилось также дренирование ограничивающей поверхности аналогично вышеописанному способу.

Исследования при номинальном расходе пара и номинальной скорости вращения ротора показали (рис. 13), что в варианте IV расширения пара на выходе из направляющих лопаток больше, чем в исходном, а в варианте V — меньше. На входном участке распределение давления соответствует выше рассмотренным вариантам. В межвенцовом осевом зазоре в варианте IV давление возрастает до значения, примерно соответствующего давлению на выходе из рабочих лопаток предыдущей ступени. В варианте V диффузорный эффект проявляется значительно меньше и он заметен только непосредственно у рабочих лопаток. Следовательно, в этом варианте могут быть более точно осуществлены расчетные данные потока.

Эксперименты показали, что экономичность исследований ступени возрастает с увеличением проходной площади. При номинальном расходе пара и номинальном числе оборотов ротора экономичность варианта IV уменьшается на 1%, а варианта V увеличивается на 2,5% по сравнению с вариантом I (рис. 14).

Расход пара через ступень при постоянном давлении перед ступенью с меридиональным обводом варианта IV уменьшился на 4,5%, в варианте V увеличился на

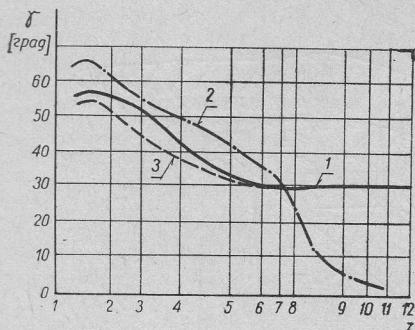
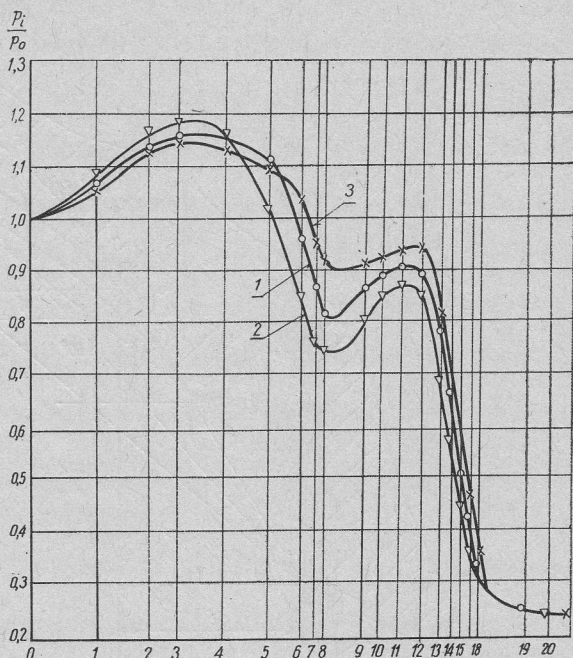


Рис. 12. Изменение угла наклона периферийного обвода последней ступени вдоль оси турбины для разных вариантов исполнения

1 — вариант I, 2 — вариант IV, 3 — вариант V. По оси абсцисс цифрами показаны номера оборотов давлений с периферийного обвода

Рис. 13. Распределение давлений по периферийному обводу направляющего аппарата последней ступени

1 — вариант I, 2 — вариант IV, 3 — вариант V



5%, т.е. изменение расхода не в точности соответствует изменению выходной площади из направляющего аппарата (рис. 15). В варианте IV произошло несколько большее уменьшение расхода по сравнению с изменением площади из-за сравнительно большего затенения периферийного сечения внутри направляющих лопаток.

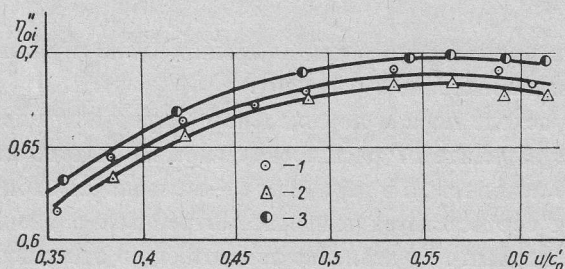


Рис. 14. Экономичность ступени при различном исполнении наружного меридионального обвода

1 — вариант I, 2 — вариант IV, 3 — вариант V

В варианте V затенение проходного сечения внутри направляющих лопаток значительно меньше, чем в I и IV вариантах, но расход также увеличился на меньшую величину, чем увеличилась проходная площадь. В данном случае на расход пара оказывает влияние не только изменение проходной площади и форма меридионального обвода, но и изменение степени реактивности (рис. 16).

Возрастание степени реактивности приводит к меньшему увеличению расхода через ступень; уменьшение — к большему увеличению расхода по сравнению с увеличением проходной площади в направляющем аппарате. Повышение экономич-

ности ступени, вызванное увеличением проходной площади в направляющем аппарате, в основном связано с упругим разворотом рабочих лопаток от действия центробежной силы. При развороте лопаток происходит увеличение проходной площади через рабочие лопатки, что вызывает уменьшение реактивности ступени.

При увеличении проходной площади в направляющем аппарате степень реактивности увеличивается и в варианте V она достигла расчетной величины. Кроме того, в этом варианте созданы лучшие условия для вывода крупнодисперсной влаги из ступени. В варианте IV пленочная влага, текущая по торцевой поверхности, накапливается в месте уступа, затем срывается потоком пара в виде крупных капель,

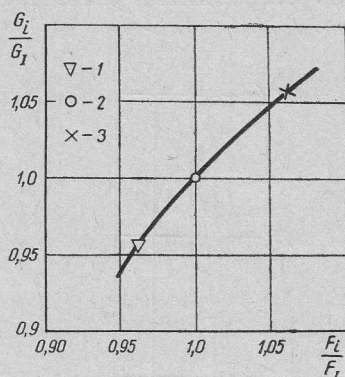


Рис. 15. Изменение расхода пара через последнюю ступень в зависимости от изменения проходной площади

1 — вариант I, 2 — вариант IV, 3 — вариант V

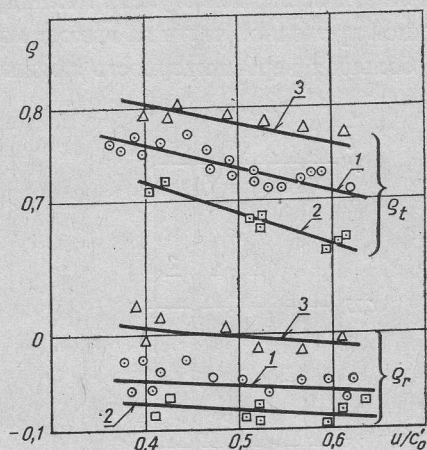


Рис. 16. Распределение реактивности для разных исполнений меридионального обвода, 1 — вариант I, меридионального обвода, 2 — вариант IV, 3 — вариант V

которые попадают на рабочие лопатки. В V варианте подобного уступа нет, поэтому пленочная влага свободно проходит в радиальном зазоре, минуя рабочие лопатки. Это приводит, как известно, к уменьшению полезной работы, развиваемой рабочим колесом.

Увеличение высоты направляющих лопаток в данном случае благоприятно сказывается на потоке, выходящем из направляющих лопаток. Как показало траверсирование потока за направляющими лопатками в верхней половине лопатки, углы выхода потока γ_1 во всех исследованных в этой серии экспериментов вариантах — существенно различны (рис. 17). Они максимальны в варианте IV и достигают 40° — минимальны в варианте V и не превышают 20° . Уменьшение углов γ_1 приводит к снижению радиальных перетеканий, что в свою очередь в соответствии с уравнением Эйлера приводит к увеличению вырабатываемой энергии, т.е. к повышению экономичности ступени.

Углы α_1 в варианте IV оказались несколько больше, чем в вариантах I и V (рис.

18). Поэтому в варианте IV несколько увеличиваются потери на обтекание рабочих лопаток.

Эти данные по traversированию потока подтверждают полученный на гидротормозе интегральный эффект повышенной экономичности варианта IV.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают, что форма меридионального обвода на периферии направляющего аппарата последней ступени при сохранении выходной площади в направляющем аппарате не оказывает влияния на экономичность ступени. Профилирование меридионального обвода с учетом увеличения площадей рабочего колеса от упругого разворота лопаток и входных условий в ступень ведет к существенному (до 2,5%) увеличению экономичности последней ступени цилиндра низкого давления. Учитывая, что в исследованной проточной части на выходе из рабочего колеса предпоследней ступени имеется большая неравномерность по высоте лопатки в распределении расхода, благо-

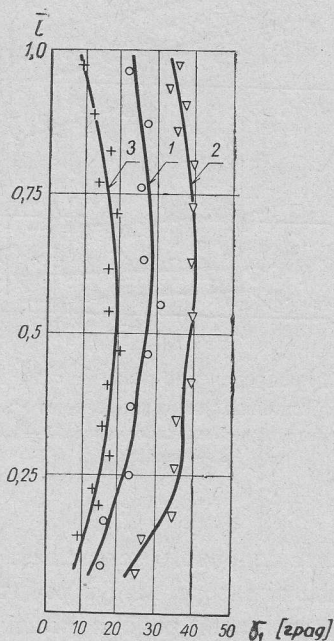


Рис. 17. Распределение углов γ_1 по высоте за направляющими лопатками
1 — вариант I, 2 — вариант IV, 3 — вариант V

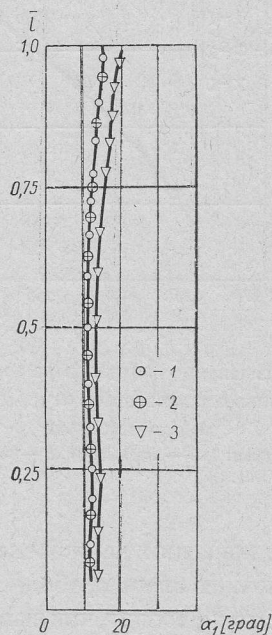


Рис. 18. Распределение по высоте лопатки угла выхода потока
1 — вариант I, 2 — вариант IV, 3 — вариант V

даря чему устраняется отрыв потока от наружной ограничивающей поверхности при всех исследованных формах меридионального обвода, то можно предполагать, что в ступенях с равномерным распределением расхода может появиться отрыв потока и в этом случае влияние подобных форм ограничивающей поверхности на экономичность ступени может быть иным. Поэтому полученные результаты могут быть использованы для ступеней с облопачиванием, аналогичным исследованному.

Badania eksperymentalne zewnętrznego merydionalnego obrysu cylindra niskoprężnego

Streszczenie

Kształt obrysu merydionalnego cylindrów niskoprężnych ma wpływ na sprawność.

Badania optymalnego kształtu zewnętrznego merydionalnego obrysu w rejonie ostatniego stopnia cylindra niskoprężnego turbiny parowej wielkiej mocy przeprowadzane były w trójstopniowej turbinie parowej z dzielonym wałem przy rzeczywistych parametrach pary. Stopień ostatni osadzony był na osobnym wale z własnym hamulcem hydraulicznym. Oprócz pomiarów mocy ostatniego stopnia prowadzone były szczegółowe badania strumienia w przekrojach kontrolnych stopnia i na obrysie zewnętrznym.

Otrzymany obraz ruchu strumienia uwidacznia źródła strat powstających przy opływie obrysu merydionalnego o skomplikowanym kształcie.

W wyniku przeprowadzonych badań wybrano optymalny kształt obrysu merydionalnego, zapewniający najwyższą sprawność ostatniego stopnia.

Experimental Investigations of the Outer Meridional Contour of a L.P. Cylinder

Summary

The form of the meridional contour of L.P. cylinders affects the efficiency.

Investigations of the optimum form of the outer meridional contour in the region of the final stage of the L.P. cylinder of a steam turbine of great output were carried out on a three-stage multishaft steam turbine, with actual steam parameters. The final stage was provided with a separate shaft having a hydraulic brake. The output of the final stage was measured and, besides, detailed investigations of the flow in control cross-sections of the stage as well as on the outer contour under investigation were carried out.

The flow pattern observed has shown the sources of losses taking place in a flow around an outer contour of complicated form.

The investigations made it possible to select the optimum form of the meridional contour ensuring the highest efficiency of the final stage.