



УДК 621.43

© В. А. Лашко, А. В. Пассар, 2008

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ОБВОДА НА СТРУКТУРУ ПОТОКА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ КОМБИНИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Лашко В. А. – д - р техн. наук, проф. кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», тел. (4212) 37-52-17, e-mail: Admin7777@rambler.ru; Пассар А. В. – инженер (ТОГУ)

Проведены расчетные исследования структуры потока в рабочих колесах радиально-осевой турбины турбокомпрессорного ряда ТКР-14, построение меридионального профиля проточной части которых осуществлялось: по рекомендациям А. Н. Шерстюка; по форме эллиптических кривых, центр которых находится на пересечении входного и выходного сечений колеса. Для сравнения произведен расчет структуры потока в рабочем колесе заводской турбины ТКР-14С-26.

Calculations are carried out for the stream pattern in operating wheels of a radial-axial turbine of the turbo-compressor TKR-14. The meridional profile of the running part of the wheels was made according to A.N.Sherstjuk by using elliptic curve shapes whose center lies at the crossover of the input and output cross-sections of the wheel. The design of the stream's structure for an operating wheel of the turbine TKR-14C-26 has been carried out for comparison.

Ключевые слова: радиально-осевая турбина, меридиональный обвод, структура потока, зона обратных токов, трехмерное твердотельное моделирование.

Теоретические предпосылки. В современной теории турбомашин для профилирования меридионального обвода проточной части радиально-осевых машин предлагается решать обратную задачу [1–8]. Однако, как показала практика решения обратных задач, линии тока получаются пилообразной формы. Применение релаксационного множителя не позволяет решить проблемы. Поэтому в работе [2] для решения данной проблемы предлагается в процессе машинного счета сглаживать линии тока. В качестве метода сглаживания рекомендуется применять метод кубической сплайн-аппроксимации. Следует отметить, что процесс сглаживания усложняет и без того сложный алгоритм расчета. Поэтому в практике проектирования принято контур мери-

дионального обвода проводить по рекомендованным значениям радиуса, а качество структуры потока проверять на основе решения прямой задачи.

В работе [9] на основе анализа работ, посвященных расчету пространственной структуры потока в проточной части радиально-осевых турбин, показано, что из существующих пространственных алгоритмов расчета ступени наиболее полно отражает физическую картину модель Я. А. Сироткина [11]. Это позволяет использовать ее для проектирования радиально-осевой турбины импульсной системы наддува комбинированного двигателя.

В настоящей работе с использованием модели Я. А. Сироткина проведены расчетные исследования по влиянию формы меридионального обвода на структуру потока в проточной части радиально-осевой турбины турбокомпрессора ТКР-14С-26.

Форма меридионального обвода проточной части рабочего колеса оказывает существенное влияние на качество структуры потока и пропускную способность турбины. Следует отметить, что для турбины, работающей в составе комбинированного двигателя, падение расхода недопустимо, так как это приведет к возникновению отраженных волн в выпускном трубопроводе и возрастанию удельного эффективного расхода топлива b_e [12].

В работах [13, 14] рекомендуется задаваться следующими значениями радиусов кривизны меридиональных обводов: внешнего $R_{\text{внеш}} = (0,15 \div 0,17)D_1$ и внутреннего $R_{\text{внутр}} = (0,25 \div 0,28)D_1$. Как показали результаты геометрических построений, меридиональные обводы, построенные по этим рекомендациям, совпадают с меридиональными обводами, построенными по методике построения, изложенной в работах [15, 16]. Поэтому в настоящей работе предлагается в качестве альтернативы меридиональному профилю, построенному по методике А. Н. Шерстюка, противопоставить меридиональный профиль, построенный по форме эллиптических кривых, центр которых находится на пересечении входного и выходного сечений рабочего колеса.

Используя современные методы трехмерного твердотельного моделирования механических деталей на персональном компьютере в среде операционной системы Microsoft Windows, были построены модели проточной части рабочих колес турбины ТКР-14С-26 (рис. 1, 2), из которых были получены все геометрические параметры расчетных областей $\beta'(l)$, $\delta'(l)$, $\chi'(l)$, t , требуемые для расчета потока. В качестве инструментального средства при-



нята российская система твердотельного моделирования КОМПАС-3D [17, 18, 19].

Для сравнения был произведен расчет структуры потока в рабочем колесе штатной турбины турбокомпрессора ТКР-14С-26. В качестве исходной информации по геометрии проточной части использовались заводские чертежи соплового аппарата и рабочего колеса этой турбины.

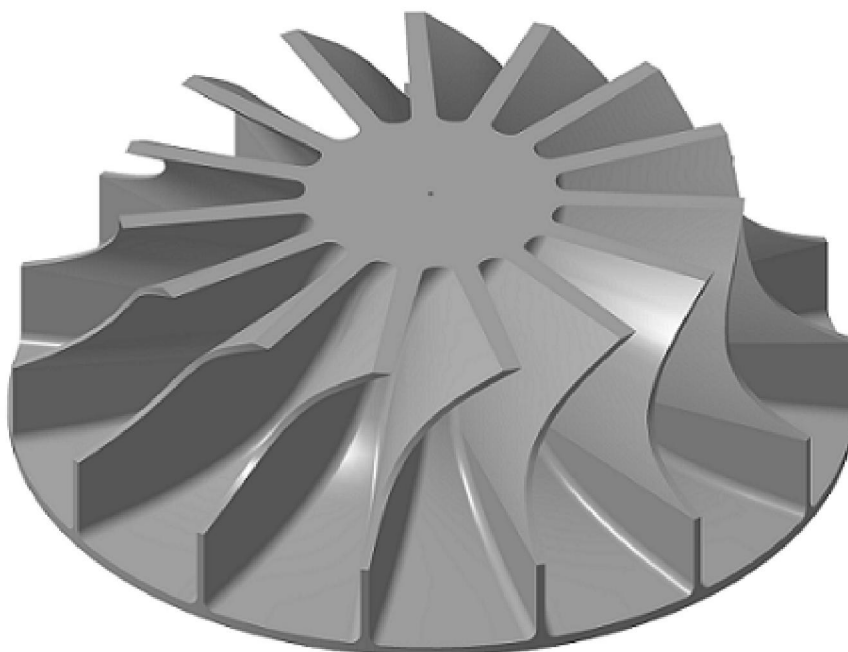


Рис. 1. Твердотельная модель рабочего колеса турбины с меридиональным профилем, построенным по методике А. Н. Шерстюка

Результаты расчетов

Используя пакет прикладных программ MATLAB [20-23], согласно алгоритму расчета, приведенному в работе [10], была составлена программа для расчета потока в проточной части. Расчет производился в следующих диапазонах изменения коэффициента напора характеристики турбины $\eta_T = f(\bar{H}_T)$: для опытной турбины $\bar{H}_T = 0,856 \div 1,92$; для штатной турбины ТКР-14С-26 $\bar{H}_T = 1,12 \div 2,12$. Результаты приведены на рис. 3–11 для соответствующих расчетных режимов:

1. Для опытной турбины

Режим № 1 – точка малого теплоперепада $\bar{H}_T = 0,856$ (течение с обратными токами); КПД турбины $\eta_T = 0,73$; расход газов $G_T = 0,1784$ кг/с; давление на входе $p_{g1}^* = 0,13$ МПа; коэффициент скорости $\psi = 0,858$; степень реактивности $\rho = 0,53$; решение было найдено за 42 итерации при коэффициенте релаксации $\alpha = 0,15$.

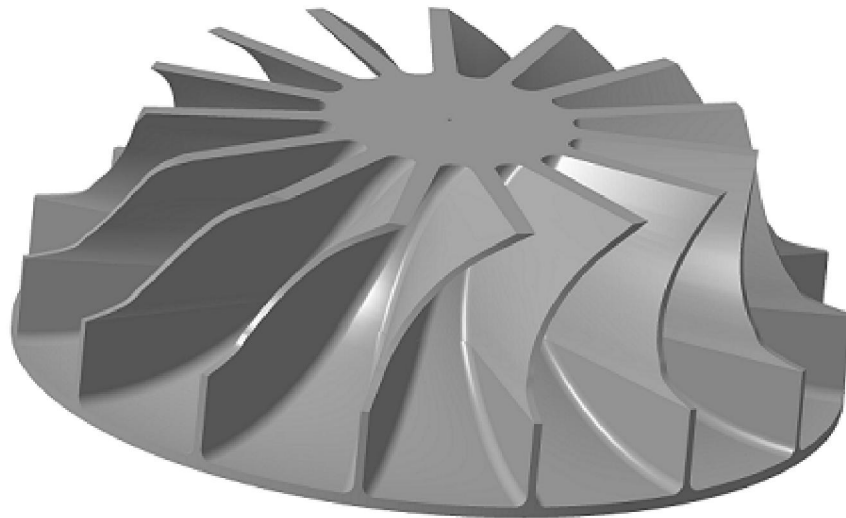


Рис. 2. Твёрдотельная модель рабочего колеса турбины с меридиональным профилем, построенным по форме эллиптических кривых

Режим № 2 – коэффициент напора $\bar{H}_T = 1,431$; КПД турбины $\eta_T = 0,804$; расход газов $G_T = 0,2653$ кг/с; давление на входе $p_{g1}^* = 0,15$ МПа; коэффициент скорости $\psi = 0,8962$; степень реактивности $\rho = 0,467$; решение было найдено за 10 итераций при коэффициенте релаксации $\alpha = 0,5$.



Режим № 3 – точка максимума КПД $\bar{H}_T = 1,918$; КПД турбины $\eta_T = 0,817$; расход газов $G_T = 0,3356$ кг/с; давление на входе $p_{g1}^* = 0,17$ МПа; коэффициент скорости $\psi = 0,915$; степень реактивности $\rho = 0,421$; решение было найдено за 10 итераций при коэффициенте релаксации $\alpha = 0,5$.

Частота вращения для всех режимов $n = 46335$ мин⁻¹.

2. Для штатной турбины

Режим № 1 – точка малого теплоперепада $\bar{H}_T = 1,151$ (течение с обратными токами); КПД турбины $\eta_T = 0,687$; расход газов $G_T = 0,2161$ кг/с; давление на входе $p_{g1}^* = 0,125$ МПа; коэффициент скорости $\psi = 0,734$; степень реактивности $\rho = 0,661$; решение было найдено за 74 итерации при коэффициенте релаксации $\alpha = 0,1$.

Режим № 2 – коэффициент напора $\bar{H}_T = 1,673$; КПД турбины $\eta_T = 0,727$; расход газов $G_T = 0,3123$ кг/с; давление на входе $p_{g1}^* = 0,135$ МПа; коэффициент скорости $\psi = 0,829$; степень реактивности $\rho = 0,547$; решение было найдено за 64 итерации при коэффициенте релаксации $\alpha = 0,1$.

Режим № 3 – точка максимума КПД $\bar{H}_T = 1,916$; КПД турбины $\eta_T = 0,733$; расход газов $G_T = 0,3521$ кг/с; давление на входе $p_{g1}^* = 0,14$ МПа; коэффициент скорости $\psi = 0,857$; степень реактивности $\rho = 0,513$; решение было найдено за 10 итераций при коэффициенте релаксации $\alpha = 0,5$.

Частота вращения для всех режимов $n = 36000$ мин⁻¹.

В результате расчета осесимметричного течения в рабочих колесах были получены меридиональные проекции скорости W_s во всех узлах сеток расчетных областей. На рис. 4, 7 и 10 показаны распределения меридиональных скоростей в зависимости от относительной длины нормалей \bar{l} . Как видно,

для всех расчетных областей с увеличением кривизны канала величина скорости в поперечных сечениях растет от внутреннего ($\bar{l} = 1$) к внешнему ($\bar{l} = 0$) обводу профиля.

Возрастание перепада скоростей w_s для расчетной области с обводами по форме эллиптических кривых происходит вплоть до выходного сечения \bar{l}_7 (рис. 4) для всех расчетных режимов и достигает максимальных значений: для режима № 1 – 163 м/с; для режима № 2 – 177 м/с; для режима № 3 – 199,6 м/с.

Для расчетной области с меридиональными обводами, построенными по рекомендациям А. Н. Шерстюка, перепад скорости w_s нарастает: для расчетного режима № 1 вплоть до сечения \bar{l}_6 , достигая своего максимального значения – 149 м/с; для расчетных режимов № 2 и 3 вплоть до сечения \bar{l}_5 , достигая максимальных значений 168 м/с и 178 м/с соответственно.

Для расчетной области штатной турбины перепад скорости w_s возрастает до сечения \bar{l}_5 (рис. 10) для всех расчетных режимов и достигает максимальных значений: для режима № 1 – 163,5 м/с; для режима № 2 – 195,5 м/с; для режима № 3 – 209,1 м/с.

Таким образом, с возрастанием коэффициента напора происходит и нарастание перепада скорости w_s . Для всех расчетных областей, несмотря на сложный характер течения, распределение меридиональных скоростей вдоль линии выходного сечения \bar{l}_7 близко к линейному закону.

На рис. 3, 6, 9 тонкими штриховыми линиями показаны линии предварительного разбиения канала по принципу равных кольцевых площадей, толстыми линиями – линии тока, определенные в результате последовательных приближений. Как видно из рисунков, поверхности тока окончательного приближения существенно отличаются от поверхностей тока исходного приближения. Во всех расчетных областях сходимость по скоростям w_s составила менее 1 %, среднее время, затраченное процессором на одну итерацию, составило 0,0122 – 0,014 с. Расчеты проводились на персональном компьютере с процессором AMD Athlon 64X2 5600+ частотой 2,8 ГГц, объем оперативной памяти 2048 Мб.

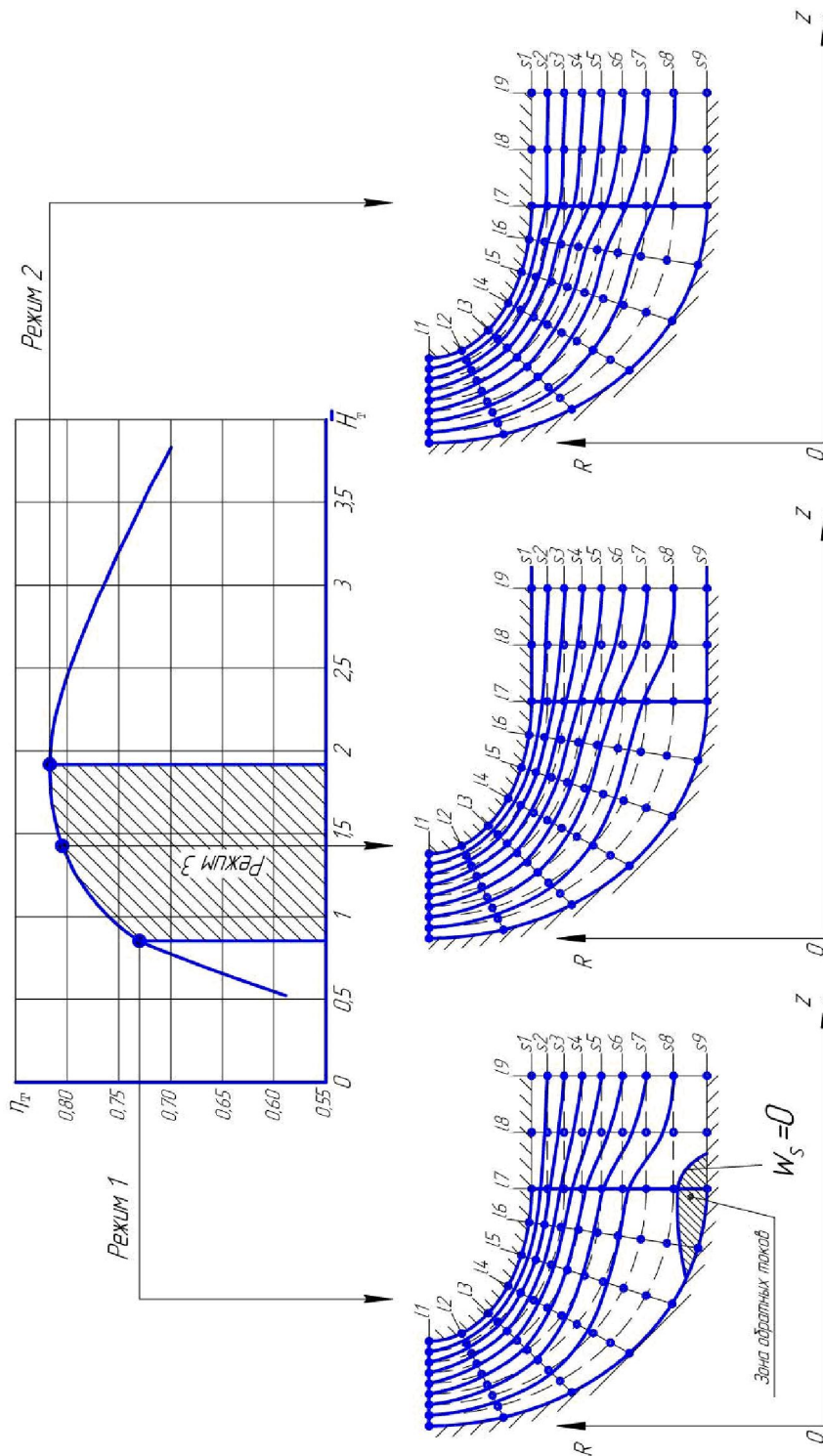


Рис. 3. Результаты расчета поверхностей тока для расчетной области с меридиональным профилем, построенным по форме эллиптических кривых

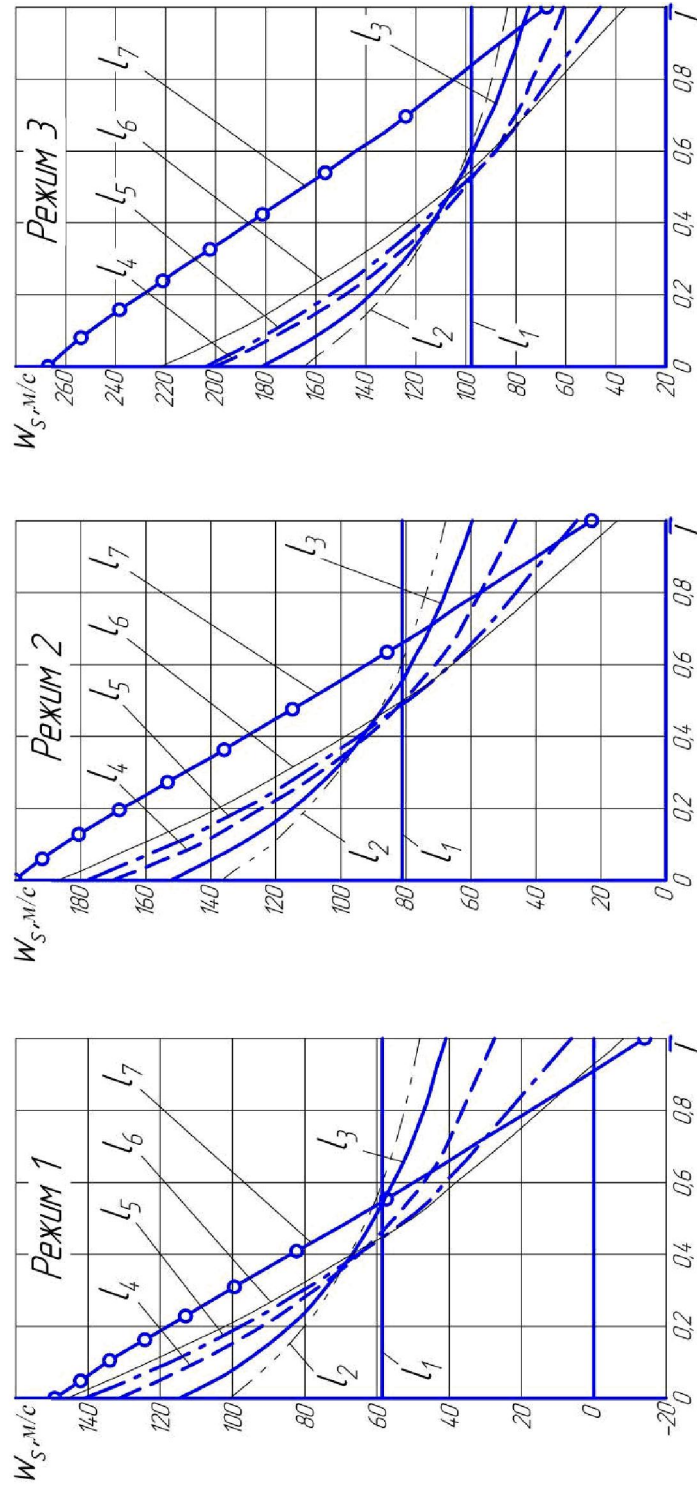


Рис. 4. Распределение меридиональных скоростей W_s в зависимости от относительной длины нормали l для расчетной области с меридиональным профилем, построенным по форме эллиптических кривых

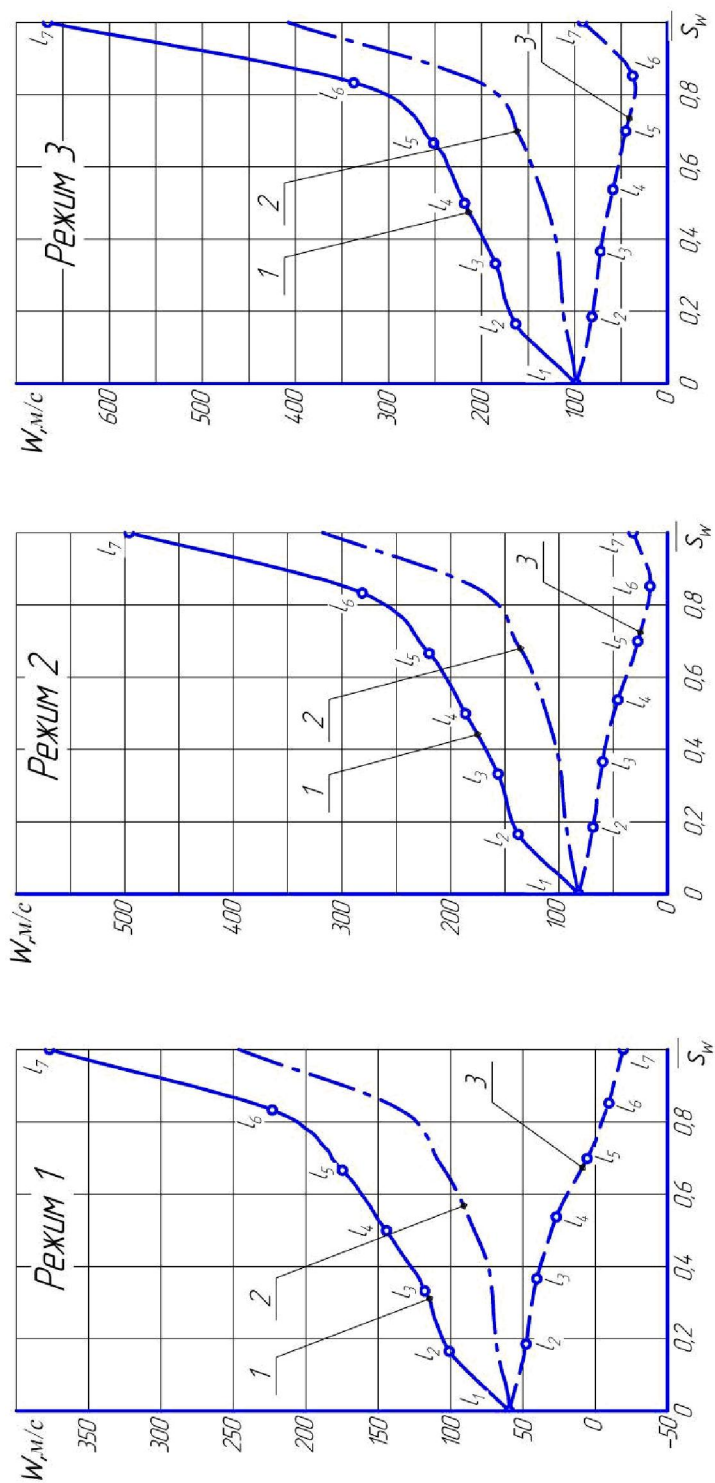


Рис. 5. Распределение относительной скорости W осредненного осесимметричного течения в расчетной области рабочего колеса с меридиональным профилем, построенным по форме эллиптических кривых: 1 – линия тока 1; 2 – линия тока 5; 3 – линия тока 9

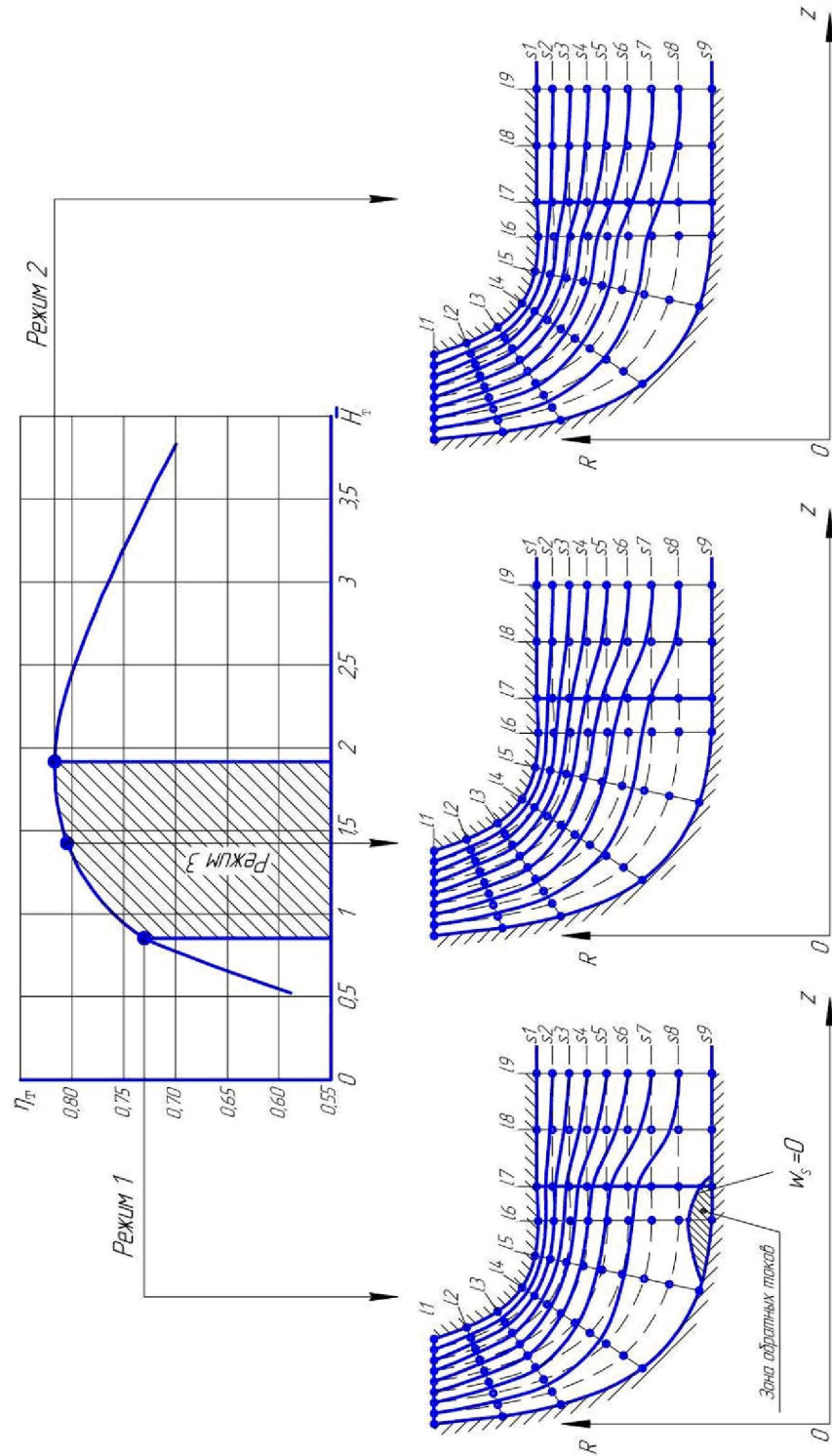


Рис. 6. Результаты расчета поверхностей тока для расчетной области с меридиональным профилем, построенным по методу А. Н. Шерстюка

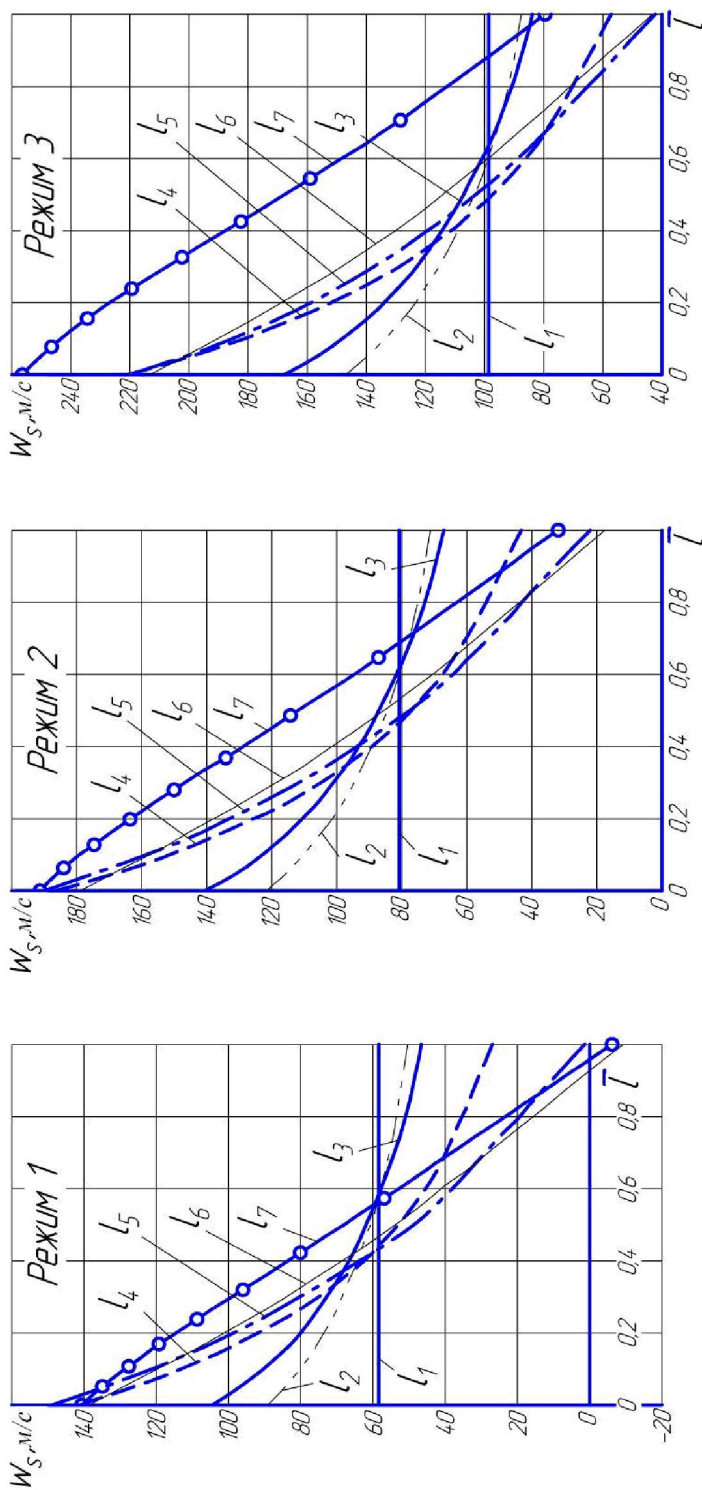


Рис. 7. Распределение меридиональных скоростей W_s в зависимости от относительной длины нормалей l для расчетной области с меридиональным профилем, построенным по методу А. Н. Шерсткога

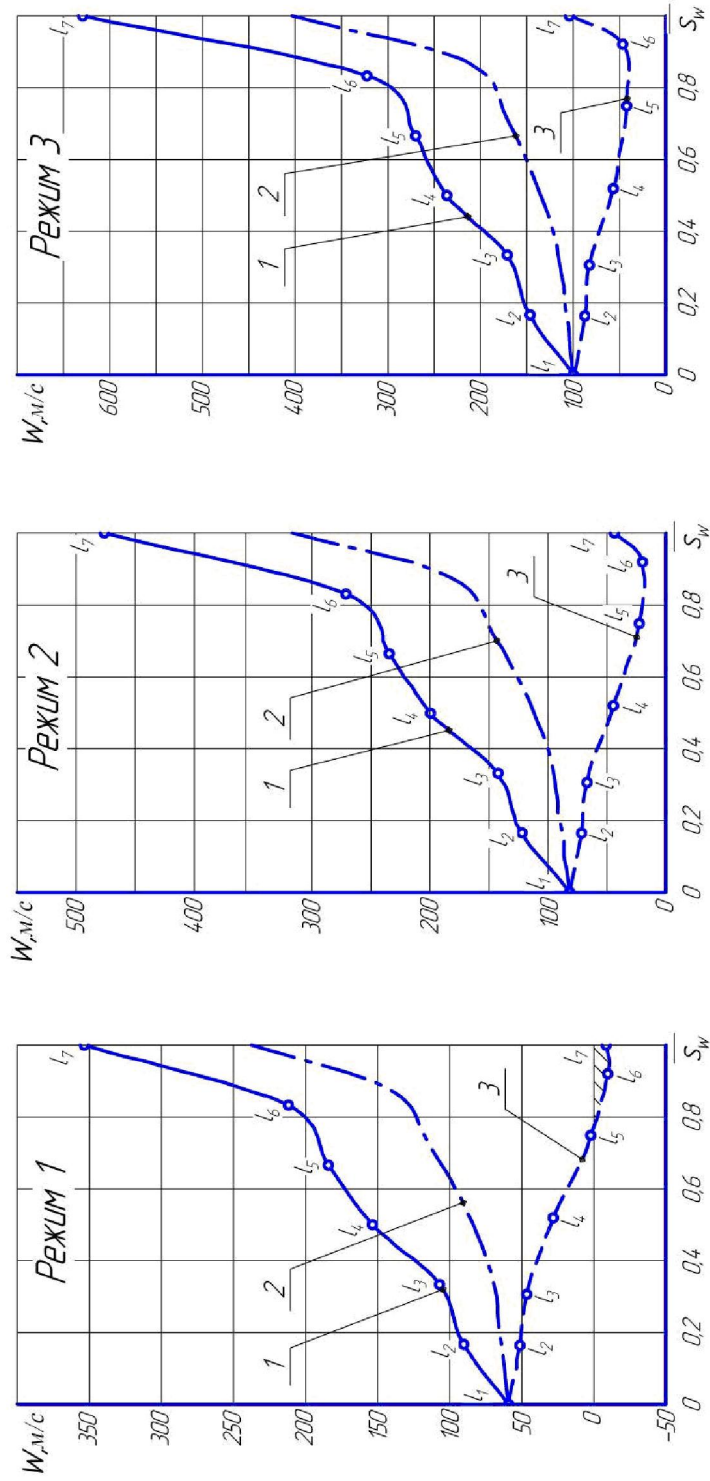


Рис. 8. Распределение относительной скорости w осредненного осесимметричного течения в расчетной области рабочего колеса с меридиональным профилем, построенным по методу А. Н. Шерстюка: 1 – линия тока 1; 2 – линия тока 5; 3 – линия тока 9

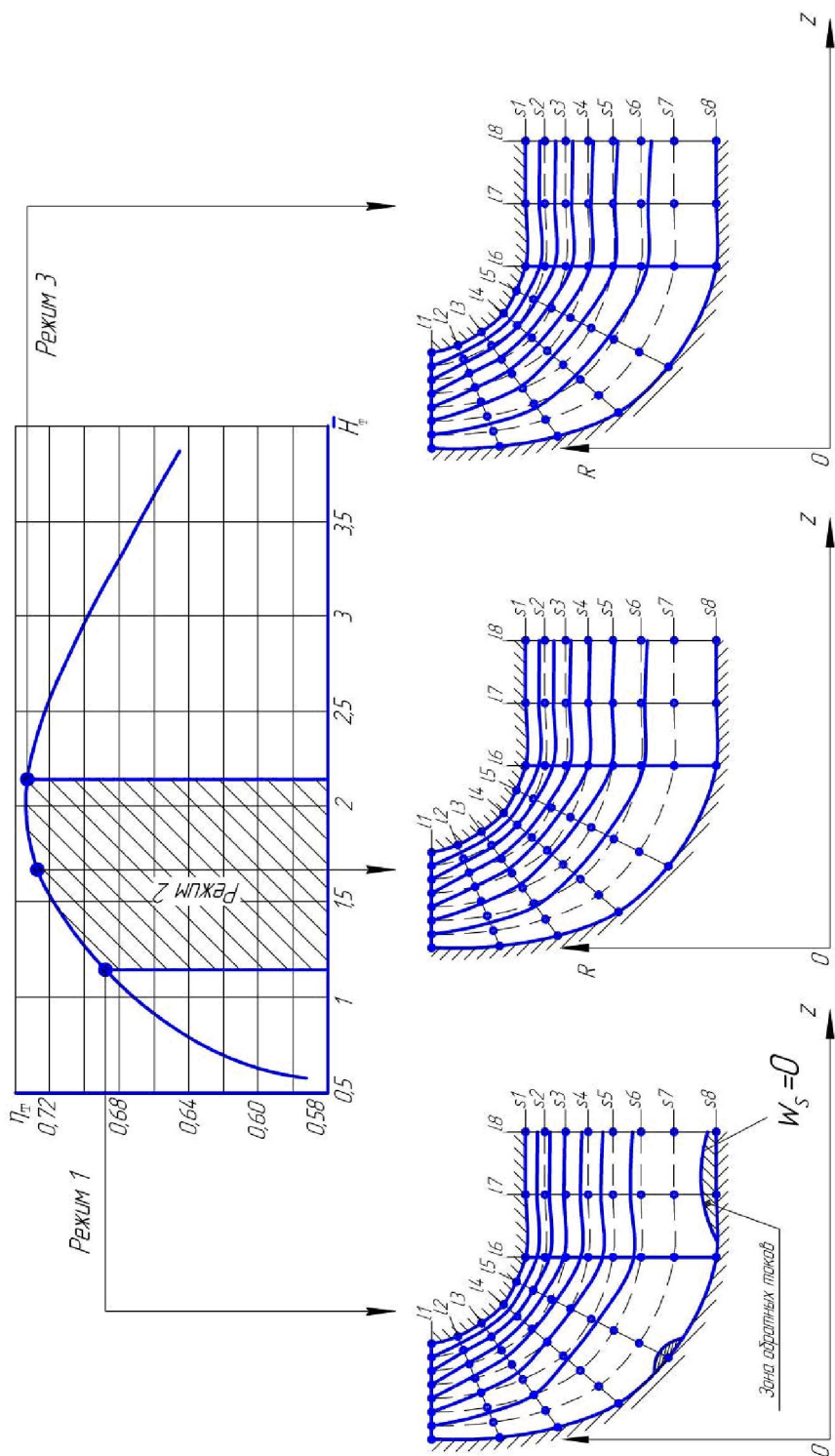


Рис. 9. Результаты расчета поверхностей тока для расчетной области шатной турбины ТКР-14С-26

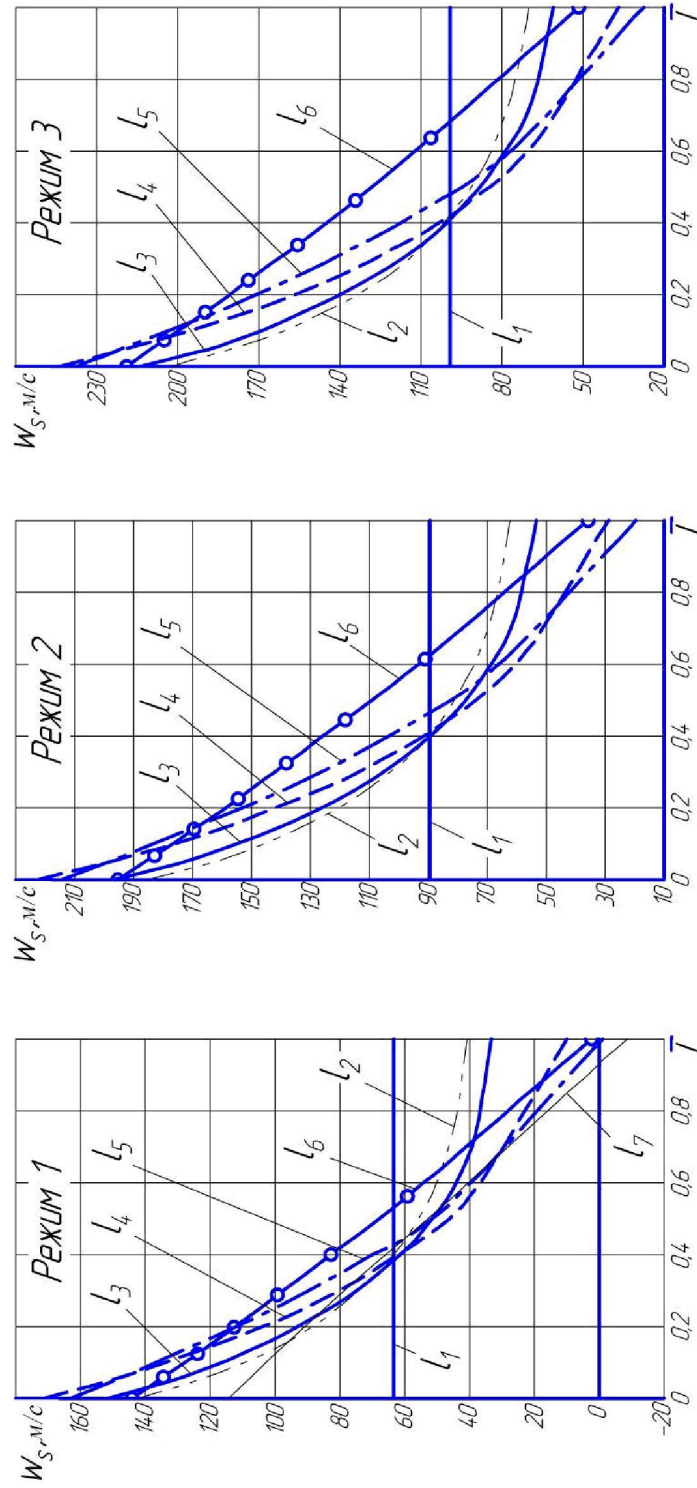


Рис. 10. Распределение меридиональных скоростей W_s в зависимости от относительной длины нормалей l для расчетной области шпатной турбины турбокомпрессора ТКР-14С-26

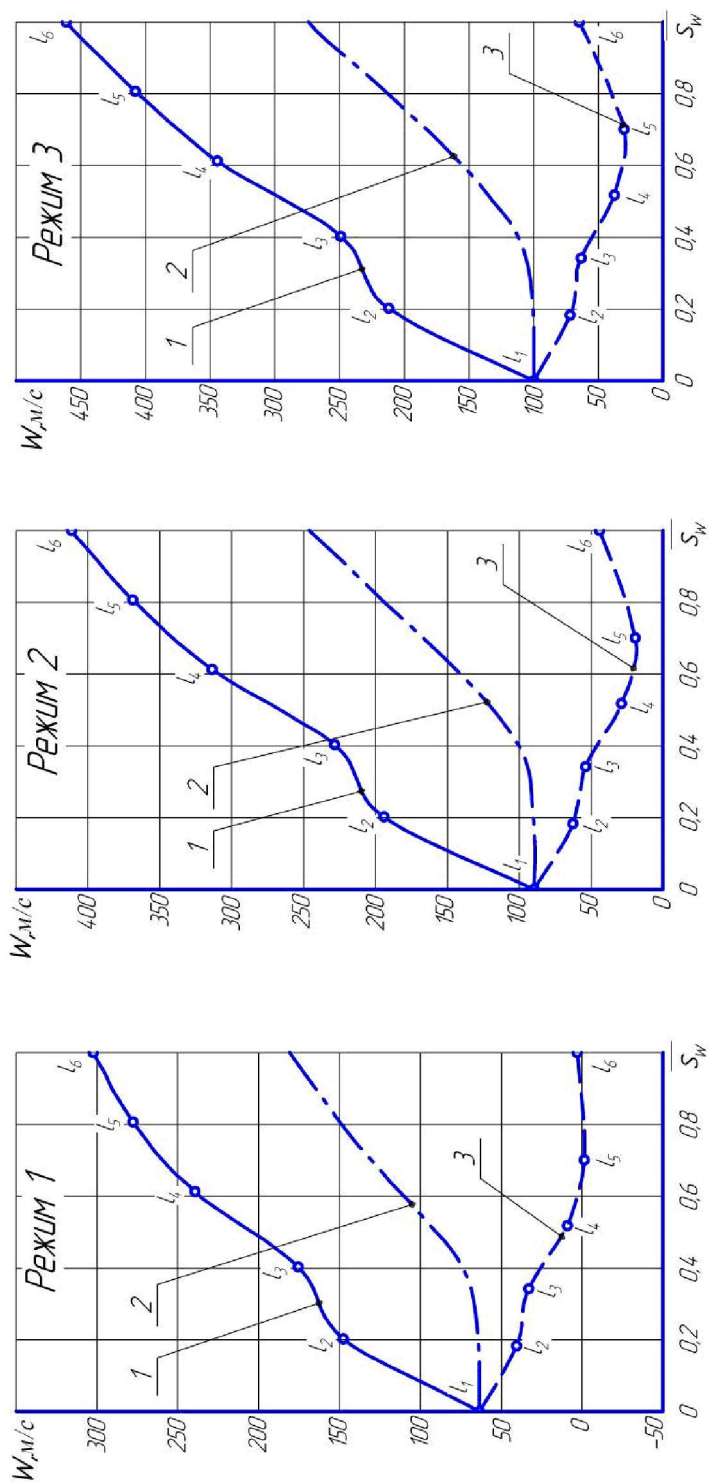


Рис. 1.1. Распределение относительной скорости w осредненного осесимметричного течения в расчетной области рабочего колеса штатной турбины турбокомпрессора ТКР-14С-26: 1 – линия тока 1; 2 – линия тока 5; 3 – линия тока 9

Как видно из рис. 3, 6, 9, с увеличением кривизны канала линии тока «поджимаются» к корпусу турбины. Особенно сильно это выражено в случае расчетного режима № 1 с низким коэффициентом напора: для опытной турбины в области линий \bar{l}_5 , \bar{l}_6 и \bar{l}_7 ; для штатной турбины в области линий \bar{l}_4 , \bar{l}_5 . Поскольку штатная турбина отличается малой осевой протяженностью, то поток не успевает выравняться, в области прямых \bar{l}_7 и \bar{l}_8 линии тока поджаты к корпусу турбины. В этих сечениях, как показали результаты расчетов режима № 1, получаются отрицательные значения меридиональных скоростей w_s : для турбины с обводами, построенными по форме эллиптических кривых порядка 8–14 м/с; для турбины с обводами, построенными по рекомендациям А. Н. Шерстюка порядка 6–9 м/с; для штатной турбины порядка 6–8 м/с. Это обстоятельство дает основание предполагать о возникновении отрыва потока (обратный ток в идеальной жидкости). На рис. 3, 6, 9 зона обратных токов заштрихована.

Граница отрывной зоны определена при условии $w_s = 0$. В безлопаточном пространстве за рабочим колесом поток выравнивается, и скорость практически не изменяется по длине l . С увеличением теплоперепада, срабатываемого в турбине, поверхности тока несколько выравниваются, так, например, в случае режима № 3 линии тока плавней, чем в случае режима № 1.

Из данных, приведенных на рис. 4, 7, 10, были получены распределения полных скоростей w по обводам профиля (рис. 5, 8, 11). По оси абсцисс отложено безразмерное расстояние \bar{s}_w длины обвода, отнесенное к общей длине обвода. По оси ординат отложена полная скорость $w = w_s / \sin \beta$. Точками на кривых помечены концы линий l . Для всех расчетных областей скорость w по внешнему обводу меридионального профиля при увеличении \bar{s}_w возрастает. Для расчетных областей опытной турбины на участке от линии l_6 до линии l_7 возрастание скорости w происходит более интенсивно, чем на остальных участках.

Вдоль внутренней линии меридионального обвода падение скорости распространяется: для опытной турбины на участок от линии l_1 до линии l_6 ; для штатной турбины на участок от первой l_1 до пятой l_5 прямой.



Для турбины с обводом, построенным по эллиптическим кривым, изменение скорости вдоль обводов происходит плавней, чем для турбины с обводами, построенными по рекомендациям А. Н. Шерстюка.

Как показали результаты расчетов режима № 3, для опытной турбины имеются сверхзвуковые включения скорости W в выходном сечении l_7 для линий тока s_1 , s_2 , и s_3 ($M_W > 1$), однако, при этом во всей области течения меридиональная скорость W_S меньше скорости звука. При моделировании течений с коэффициентами напора $\bar{H}_T > 1,916$ нарушается условие эллиптичности, $M_S < 1$, и решение не может быть найдено, о чем свидетельствуют осцилляции линий тока.

Выводы

1. Меридиональный обвод оказывает огромное влияние на образование локальных отрывных течений, что позволяет считать его одним из главных геометрических воздействий при оценке эффективности прохождения газодинамического потока через проточную часть турбины.

2. Выбор геометрической формы меридионального обвода является отдельной оптимизационной задачей, и в будущем она должна быть включена в виде программного модуля при оптимальном проектировании турбин комбинированных двигателей внутреннего сгорания.

3. Предложенный метод Я. А. Сироткина позволяет в дальнейшем на базе генерирования различных структур потока подойти к управлению газодинамическим потоком в проточной части турбины.

4. Необходимо уже на данном этапе проведения расчетов констатировать, что штатная турбина имеет слишком малую осевую протяженность по сравнению с опытной, это вызывает значительную неравномерность линий тока, благоприятствует образованию отрывных зон.

5. Меридиональные профили, построенные по эллиптическим кривым и по рекомендациям А. Н. Шерстюка, можно считать идентичными, однако, изменение скорости в колесе с эллиптическим обводом происходит плавней. Геометрическое построение меридиональных обводов по эллиптическим кривым – процесс гораздо менее трудоемкий, чем построение обводов по методике А. Н. Шерстюка. По этим причинам эллиптический обвод является наиболее приемлемым и его следует рекомендовать к применению.

Библиографические ссылки

1. Дорфман Л. А., Серазетдинов А. З. Численное решение на ЭЦВМ задач осредненного осесимметричного потока в турбомашинах // Энергомашиностроение. 1969. № 7.
2. Дорфман Л. А. Численные методы в газодинамике турбомашин. Л., 1974.
3. Степанов Г. Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М., 1962.
4. Сироткин Я. А. Аэродинамический расчет лопаток осевых турбомашин. М., 1972.
5. Жуковский М. И. Аэродинамический расчет потока в осевых турбомашинах. Л., 1967.
6. Розенберг Г. Ш. Центростремительные турбины судовых установок. Л., 1973.
7. Шабаров А. Б. К вопросу профилирования рабочего колеса центростремительной турбины // Известия вузов. Машиностроение. 1982. № 1.
8. Шабаров А. Б., Тарасов В. В. Оптимальное проектирование проточной части радиально-осевой турбины // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 11.
9. Лашко В. А., Пассар А. В. Выбор инструментария для расчета радиально-осевых турбин, работающих в условиях нестационарного потока // Вестник ТОГУ. Хабаровск. 2007. № 4(7).
10. Лашко В. А., Сироткина Я. А. Модель как инструментарий для анализа геометрических параметров радиально-осевой турбины комбинированного двигателя // Известия вузов. Машиностроение. 2008. № 2.
11. Сироткин Я. А. Расчет осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в радиальных турбомашинах // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1963. № 3.
12. Симсон А. Э. Газотурбинный наддув дизелей. М., 1964.
13. Митрохин В. Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины на стационарных и переходных режимах. М., 1974.
14. Розенберг Г. Ш. Судовые центростремительные газовые турбины. Л., 1964.
15. Зарянкин А. Е., Шерстюк А. Н. Радиально-осевые турбины малой мощности. М., 1963.
16. Шерстюк А. Н., Зарянкин А. Е. Радиально-осевые турбины малой мощности. М., 1976.
17. Потемкин А. Е. Твердотельное моделирование в системе КОМПАС-3D. СПб., 2004.
18. Кудрявцев Е. М. Компас – 3D V6: Основы работы в системе. М., 2004.
19. Кидрук М. И. Компас – 3D V9: Учебный курс. СПб., 2007.
20. Потемкин В. Г. Вычисления в среде MATLAB. М., 2004.
21. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. СПб., 2005.
22. Джон Г. Мэтьюз, Финк Д. Куртис. Численные методы. Использование MATLAB. М., 2001.
23. Кривилев А. В. Основы компьютерной математики с использованием системы MATLAB. М., 2005.