

УДК 621.452

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ
В ЛОПАТОЧНОЙ РЕШЕТКЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ТУРБИН (МРТ)****Зеленов С.Н., Семашко П.В.***Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Ниžний Новгород, e-mail: nntu@nntu.ru*

Настоящая статья посвящена выбору и обоснованию метода исследования потерь в проточной части малоразмерных турбин (МРТ). Рассмотрены особенности конструкций МРТ и особенности проведения исследований по повышению их эффективности. Выполнено обобщение и проанализированы существующие методики исследований потерь в лопаточных каналах. На примере решения задачи повышения эффективности (КПД) привода пневмоинструмента показаны преимущества совместного использования дымовых продувок и компьютерного моделирования течений газов в решетках, в частности в ПК Flow Vision. Для работы в пакете Flow Vision производилось геометрическое моделирование решеток в САПР AutoCAD. Сравнение полученных двумя методами картин течений в решетках показало их хорошее совпадение и позволило более достоверно выбрать направление совершенствования сопловых аппаратов. В результате выполнения работы были найдены рациональные геометрические размеры сопловых лопаток МРТ.

Ключевые слова: малоразмерные турбины, методика проектирования, сопловой аппарат, рабочие лопатки, эффективность (КПД)

**EXPERIMENTAL-DESIGN STUDIES OF LOSSES IN THE GRID
OF SMALL TURBINE BLADE (MRT)****Zelenov S.N., Semashko P.V.***Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: nntu@nntu.ru*

This article is devoted to the selection and justification of the research method of losses in small turbine flow passage (MRT). The features of the designs and features of the MRT research to improve their efficiency. Solved compile and analyzed existing research techniques of losses. For example, decisions to increase efficiency (KPD) drive pneumatic tools showing the benefits of flue systems and computer modeling of flows of gases, lattices in particular, PC Flow Vision. To work in a batch Flow Vision produced geometric modeling arrays in AutoCAD. Comparison of two methods of paintings of currents in the arrays showed them a good match and allowed more reliably pick a direction of improvement of nozzle. As a result of the execution of the work were found rational dimensions of nozzle blades of MRT.

Keywords: small turbines, design technique, nozzle apparatus, blades, efficiency (KPD)

Малоразмерные турбины (МРТ) мощностью от нескольких десятков Вт до нескольких кВт и диаметром колес до 100 мм представляют собой широкий по своим основным характеристикам класс турбин.

Исследования по совершенствованию конструкций МРТ интенсивно ведутся во всех областях энергетики малых мощностей [1–4]. Среди проводимых работ следует выделить научно-исследовательские работы по повышению КПД МРТ, используемых в агрегатах массового применения, например в пневматических турбошлифовальных машинах. Так как на практике количество пневмомашин исчисляется сотнями тысяч штук, то с учетом высокой стоимости сжатого воздуха повышение их эффективности является актуальной технико-экономической задачей.

Материалы и методы исследования

Проектируемые для различных нужд МРТ порой значительно отличаются друг

от друга по ряду весьма важных конструктивных признаков. Однако большинству этих турбин присущи и общие свойства, позволяющие разработать некоторые единые принципы подхода к их расчету и проектированию, приведем некоторые из них.

1. Ограничения по габаритам и частоте вращения, что приводит к необходимости проектировать турбины с повышенными нагрузками и высокими перепадами давлений на ступени. Требования простоты конструкции МРТ обуславливают применение одновенечных или двухвенечных конструкций ступеней (чаще активных).

2. Преобладание сил вязкости над силами инерции, характерное для движения вязкого сжимаемого газа в малых каналах вследствие малой величины числа $Re = \frac{C_1 \cdot b_c}{\nu}$, где b_c – размер хорды профиля соплового аппарата (СА), C_1 – абсолютная скорость потока на выходе из канала, ν – кинематическая вязкость газа. В воздушных МРТ с температурами среды $T = 300$ К чис-

ло Рейнольдса обычно изменяется в диапазоне: $5 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^6$.

3. Малая, в сравнении с большими турбинами, относительная длина сопловых лопаток $\bar{l}_c = l_c / D_{cp} = 0,03 \dots 0,1$; в формуле: l_c – длина сопловых лопаток, D_{cp} – средний диаметр диска (для больших турбин $l_c = 0,1 \dots 0,2$).

4. Существенно большие, чем в больших турбинах, величины относительной толщины кромок лопаток, шероховатости и зазоров, что приводит к увеличению потерь в сопловых и рабочих решетках.

5. Поскольку осевые и радиальные зазоры в больших и малоразмерных турбинах соизмеримы, а диаметр колеса МРТ на порядок меньше, то относительные зазоры и относительные потери от утечки в ступенях МРТ существенно выше.

6. Из-за малых размеров ядра потока в решетках МРТ трудно произвести разделение потерь на профильные и концевые, поэтому при оценке эффективности МРТ целесообразно рассматривать суммарные потери.

В теории турбин существуют два основных подхода к определению потерь в турбинных решетках. Первый представлен теоретическими методами, основанными на расчете пограничного слоя, развивающегося вдоль профиля лопатки. Этот подход универсален, однако из-за допущений, принимаемых обычно для упрощения задачи, погрешность теоретических методов расчета течения газа в межлопаточных каналах пока ещё велика.

Наиболее достоверные результаты в таких случаях дают эмпирические методики. При построении таких методик можно выделить четыре основных подхода:

- 1) разработка полуэмпирических методик;
- 2) обобщение экспериментальных данных;
- 3) применение методов математической теории эксперимента (МТЭ);
- 4) применение методов компьютерного моделирования.

В рамках первого подхода разрабатываются методики, использующие допущение о разделении потерь в проточной части на составляющие: потери на трение, кромочные, концевые, волновые и т.п. Для ступеней МРТ из-за крайне малых сечений межлопаточных каналов подобное разделение потерь может вообще не иметь физического смысла.

Второй подход заключается в получении новых экспериментальных данных, иногда на вновь разработанных стендах. Для разработки таких методик возможно использование данных других авторов,

однако они, как правило, имеют разную точность, группируются обычно в узком интервале изменения основных параметров, что затрудняет разработку математической модели. В целом для МРТ экспериментальный материал невелик, а по исследованию микрорешеток практически отсутствует.

Третий подход заключается в установлении зависимости коэффициентов потерь в решетках от основных определяющих параметров методами математической теории экспериментов (МТЭ). Эти методы позволяют получить математическую модель для расчета потерь в решетках, учитывающую влияние геометрических и режимных параметров, а также решать эту задачу с требуемой точностью и минимальным числом экспериментов.

Принимая во внимание относительно малые стоимость и трудоёмкость изготовления ступеней МРТ, этот путь является приемлемым при условии рационального выбора числа определяющих параметров на основании анализа их влияния на потери.

Методы компьютерного моделирования (четвёртый подход), получающие в настоящее время всё большее распространение, связаны с быстрыми темпами развития ЭВМ и программного обеспечения. Преимущество данных методов заключается в отсутствии необходимости создавать множество натурных экспериментальных моделей и комплексы для их тестирования.

Целью данной работы являлось повышение энергетической эффективности МРТ за счет реализации конструктивных рекомендаций по снижению потерь в СА, полученных на основе анализа результатов расчетно-экспериментальных исследований течения газа с использованием моделирования течения газа в ПК *FlowVision*.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные методы исследования аэродинамических характеристик решеток МРТ дают возможность получить количественные данные о степени их аэродинамического совершенства, но не позволяют выявить особенности картины течений, которые важны при совершенствовании турбинных профилей (СА и рабочих лопаток) [5, 6]. Поэтому в работе предварительно были выполнены визуальные исследования течений в элементах ступеней. Примеры профилей лопаток сопловых аппаратов С-1 и С-7, спрофилированных по традиционной методике, приведены на рис. 1.

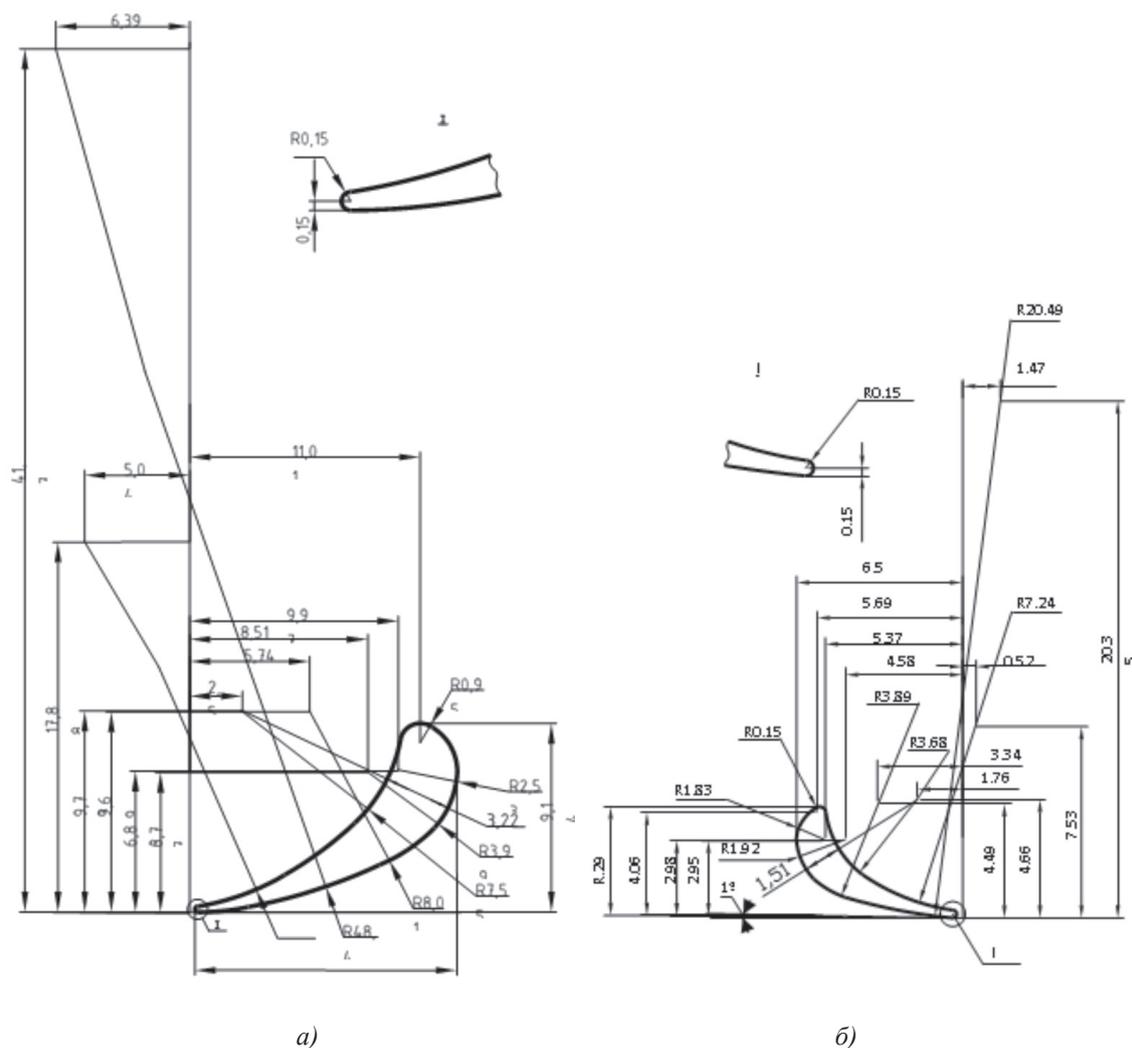


Рис. 1. Профили лопаток сопловых аппаратов: а) сопловой аппарат С-1; б) сопловой аппарат С-7

Эксперименты проводились на специально спроектированной установке [7], анализ результатов и рекомендации основывались на картинах следов, оставляемых окрашенным потоком на наружной цилиндрической образующей лопаток. Продувки выполнялись при различных режимах течения в зависимости от перепада давлений на СА $\pi = \frac{P_0^*}{P_{2ст}}$, где P_0^* и $P_{2ст}$ соответственно полное давление до и после СА. Полученные следовые снимки течения на периферии каналов решеток С-1 и С-7 приведены на рис. 2. На снимках можно выделить несколько различных по интенсивности окраски зон. Их последовательность по ходу потока следующая.

В зоне входа потока в СА (там, где его скорость невелика) частицы сажи практически не осаждаются, поэтому этот уча-

сток наружной образующей не окрашивается. Во фронтальном сечении входа потока в СА происходит осаждение сажи на кромках лопаток.

В межлопаточном канале интенсивность осаждения сажи различна вдоль спинки и корытца профиля: вдоль спинки след очерчен ярче, но ширина его мала. После прохождения входной кромки след начинает терять свою интенсивность, увеличиваясь по ширине при движении к горловому сечению канала, и сливается со следом, огибающим спинку профиля. Предположительно такой характер осаждения сажи связан с наличием отрыва потока от спинки профиля и вторичных течений, направленных к его вогнутой части. Далее по ходу потока происходит повышение интенсивности окраски следа, которая не меняется вплоть до выходного

сечения канала. Такая картина характерна для всех испытанных СА и практически не зависит от начального давления воздуха. Вблизи выходной кромки со стороны спинки лопаток СА практически на всех режимах течения образуется затемнённое пятно овальной формы. Оно наиболее заметно при сверхзвуковых течениях, и его интенсивность увеличивается с ростом перепада давлений на решетке. Расположение пятна зависит от величины π , и с его увеличением оно смещается вниз по течению. За выходной кромкой лопатки возникает участок с повышенной интенсивностью окраски, интенсивность и размеры которого уступают соответствующим характеристикам пятна. В области, находящейся за выходным сечением лопаток СА, картины осаждения сильно отличаются друг от друга в зависимости от формы канала и режима работы. При дозвуковом течении в области косога среза наблюдается плавное обтекание спинки лопатки и практически равномерная окраска снимка с небольшим сгущением в области кромочного следа. Измерение углов потока с помощью моментомера [8] показало, что на этих режимах эффективный угол выхода потока α_{13} практически соответствует геометрическому углу $\alpha_{1Г}$ решеток СА. При увеличении величины

π на визуальной картине потока появляется ярко очерченный кромочный след, который сохраняет свою форму практически по всей длине снимка. Одновременно начинают появляться поперечные полосы темной окраски, которые одним концом опираются на спинку лопатки, другим – на кромочный след. Судя по характеру окраски и форме этой зоны можно предположить, что такой характер отпечатка соответствует отрывному течению. Угол выхода потока $\alpha_{1Г}$ с увеличением π сначала меняется очень сильно, затем, в большинстве случаев достигая предельного значения в 3...6 раз превышающего $\alpha_{1Г}$, увеличиваться практически перестает.

Анализ дымовых снимков, оставляемых окрашенным активным потоком на выходе из СА, выявил недостатки существующих методов профилирования лопаток, в результате которых сопловая решетка МРТ достаточно эффективна на дозвуковых и околосзвуковых скоростях, но неработоспособна на сверхзвуковых при $\pi > 2,5$. Поэтому была разработана турбинная решетка с сужающимся сопловым каналом, в котором длина выходного участка приблизительно вдвое больше ширины горла его проходного сечения. Новый профиль с $\alpha_{1Г} = 16^\circ$ показан на рис. 3.

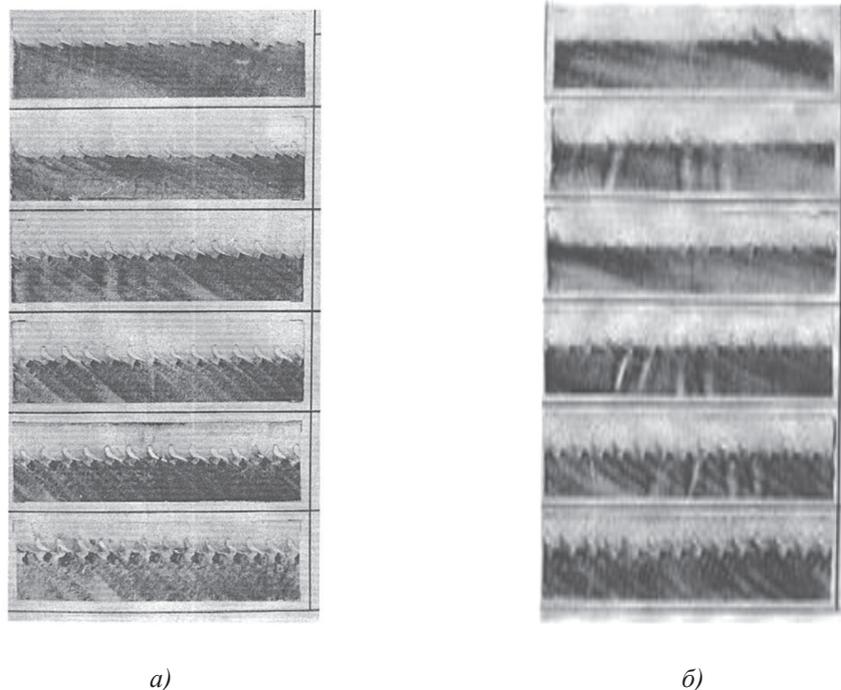


Рис. 2. Картины визуализации потока: а) решетка С-1 $\alpha_{1Г} = 16^\circ$; $l/b = 0,127$; $t = 13,8$ мм; $b/D_{cp} = 0,444$; б) решетка С-7 $\alpha_{1Г} = 8^\circ$; $l/b = 0,127$; $t = 13,8$ мм; $b/D_{cp} = 0,284$

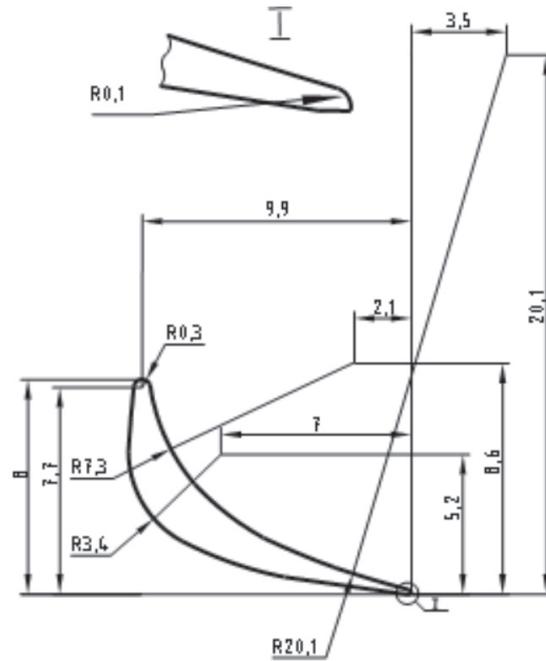
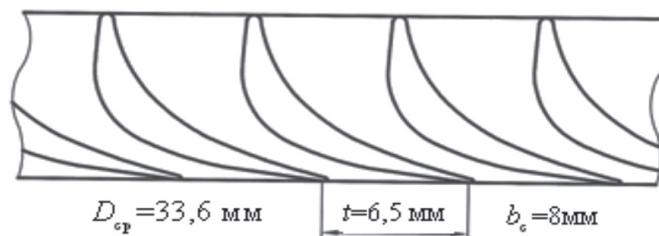
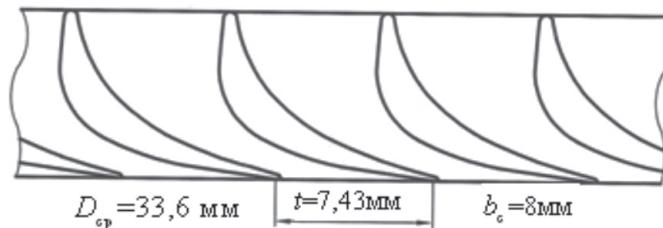


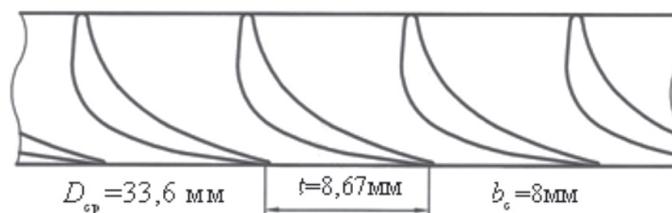
Рис. 3. Профиль лопатки СА с удлиненной выходной кромкой



а)



б)



в)

Рис. 4. Решетки профилей СА с удлиненной выходной частью: а) $t/b_c = 0,81$; б) $t/b_c = 0,93$; в) $t/b_c = 1,08$

В эксперименте, который проводился на СА, имеющем: $D_{cp} = 33$ мм; $l_c = 3$ мм; $b_c = 8$ мм, варьировалось число лопаток (рис. 4), всего было испытано 3 варианта СА с различным относительным шагом решетки. Эксперимент показал, что оптимальный результат достигается в ступени с СА, который имеет решетку с 16 лопатками (рис. 4, а). Проведенная визуализация потока в решетке показала на хорошее формирование линий тока, отсутствие сильных скачков и срывных явлений (рис. 5).

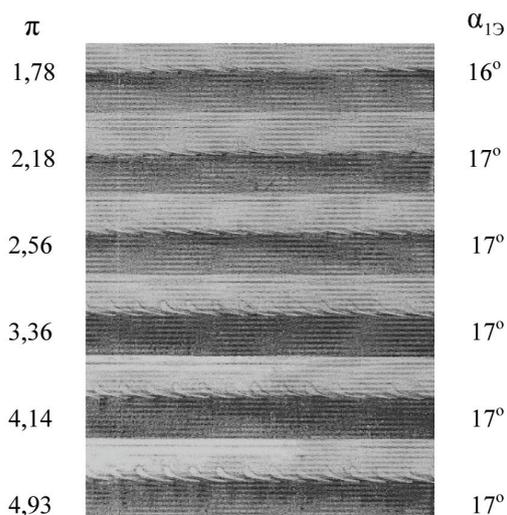


Рис. 5. Картины визуализации потока в решетке с лопатками с удлиненной выходной частью

Было проведено сравнение КПД ступени $\eta_c = f\left(\frac{U}{C_1}\right)$, имеющей в своем составе СА с удлиненной выходной частью,

с зависимостями традиционных ступеней МРТ. Анализ полученных результатов показал, что в до- и околозвуковой областях КПД такой ступени ниже, чем КПД ступени с обычным СА, что можно объяснить повышенными потерями на трение в решетке и кромочными потерями. При $\pi \approx 2,3$ эффективность лопаточных решеток с удлиненной выходной кромкой выравнивается с эффективностью традиционных сопловых решеток МРТ. При большем перепаде давлений на ступени их КПД становится значительно выше, чем у традиционных решеток, и при $\pi = 5$ относительное повышение КПД достигает 15...25%.

Проведение эксперимента в программном комплексе *Flow Vision (FV)*

Программный комплекс *FV* используется для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики [9]. Использование различных моделей турбулентности и адаптивной расчетной сетки позволяет моделировать самые сложные случаи течений.

В данной работе целью эксперимента в комплексе *FV* являлось установление качественной картины течений, которая важна при совершенствовании турбинных профилей, а также установление зависимости угла и характера потока на выходе из решетки от геометрических характеристик лопаток СА [10].

Авторами использовался «ручной» метод задания режимов работ ПК. Расчетные данные экспортировались в *MS Excel*, в котором строился график сходимости расхода на входе и выходе из соплового аппарата. Задача считалась решенной, когда расходы газа на входе и выходе совпадали.

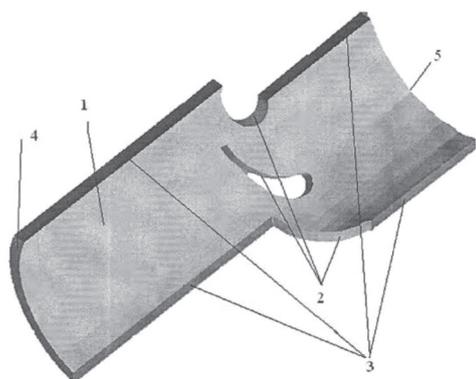


Рис. 6. Граничные условия: 1 – стенка; 2 – лопатка; 3 – граничные поверхности с условием «периодическое»; 4 – выход; 5 – вход



Рис. 7. Картина циклического клонирования

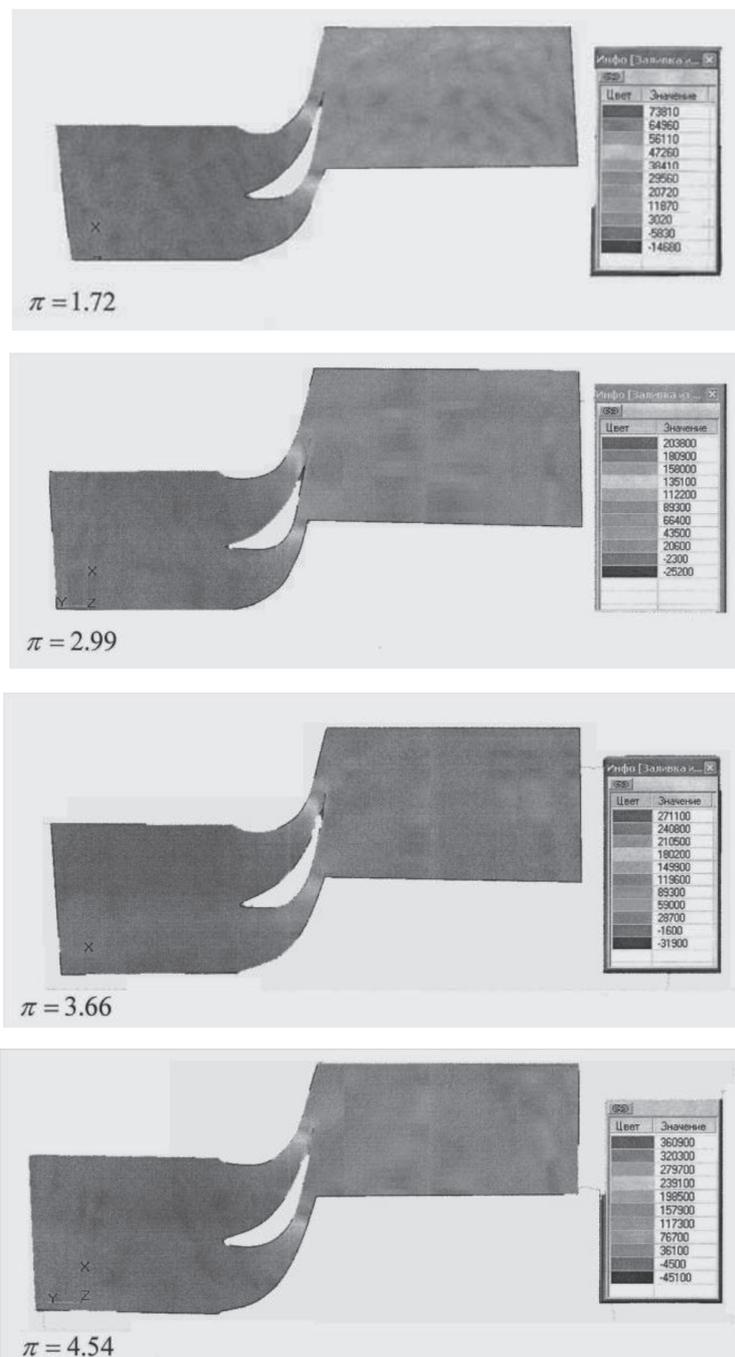


Рис. 8. Поля давлений в СА с лопатками с удлиненной выходной кромкой и 16-ю лопатками

Для эксперимента в САПР *AutoCAD* были построены сопловые аппараты с использованием лопаток, представленных на рис. 1, 3, а также решеток профилей сопловых аппаратов, представленных на рис. 4. После преобразования рисунков в необходимый формат (*.stl) и импорта их в ПК *FV* задавались: модель расчета, начальные параметры, граничные условия, свойства веществ, строилась расчетная сетка.

В решаемой задаче принималась расчетная модель *Full Compressible fluid* (Полностью сжимаемая жидкость). В списке рассчитываемых уравнений отмечались *Energy* (Энергия), *Velocity* (Скорость) и *Turbulence* (Турбулентность). Из физических параметров задавались *Initial Values* (Начальные значения): температура 20 °С; давление 200 кПа. Были созданы граничные условия: вход, выход, стенки, лопатки. Для ускорения

процесса расчета и улучшения отображения картины течения газа расчет проводился не для всего соплового аппарата, а для его сектора, состоящего из двух межлопаточных каналов (рис. 6). При этом на дополнительно образовавшихся поверхностях задавалось граничное условие – «периодическое». Впоследствии, по окончании расчета программа отображала результат расчета на весь сопловой аппарат путем циклического клонирования (рис. 7).

Далее задавался расход газа через входное сечение. На выходе устанавливалось условие – «свободный выход». Изменяя расход на входе, получали необходимый перепад давлений на сопловом аппарате.

Хотя полученные картины моделирования несколько отличаются от дымовых снимков, полученных на стенде, принципиально по ним можно сделать аналогичные выводы о качестве формирования потока газа в различных сопловых аппаратах. Наилучший результат во всём диапазоне изменения перепада давления, как и при натурных испытаниях на стенде, показала решётка, имеющая 16 лопаток с удлинённой выходной кромкой (рис. 8).

Заключение

1. Совершенствование течения газа в сопловом аппарате является перспективным направлением повышения эффективности МРТ, при этом суммарные потери энергии целесообразно определять на специальных исследовательских стендах.

2. В работе проведена отработка методики оптимизации формы и числа сопловых лопаток МРТ. Численное моделирование процессов осуществлено при помощи программного комплекса *FlowVision* с использованием методов МТЭ, позволивших проводить многопараметрическую оптимизацию за минимальное число итераций. Геометрия лопаток СА с необходимыми размерами создавалась в системе *AutoCAD*.

3. Проведенные расчетные исследования позволили детально проанализировать картину течения и проработать конструкцию рабочих лопаток СА. Получено удовлетворительное соответствие по зна-

чениям и характеру суммарных расчетных (*FlowVision*) и экспериментальных характеристик.

4. Полученные результаты демонстрируют возможность применения *FlowVision* совместно с *CAD*-системами и методами МТЭ для повышения эффективности МРТ. Необходимо отметить, что оптимизация может производиться по многим параметрам и от этого можно получать суммарный полезный эффект.

Список литературы

1. Фершалов Ю.Я. Сопловые аппараты турбин и их эффективность [Текст] / Ю.Я. Фершалов, В.М. Акуленко, М.Ю. Фершалов // Вестник Морского государственного университета. Сер. Судостроение и судоремонт. – 2011. – Вып. 47. – С. 70–77.
2. Фершалов Ю.Я. Экспериментальные исследования сопел [Текст] / Ю.Я. Фершалов, Т.В. Сазонов // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – № 1 (14). – С. 34–48.
3. Забелин Н.А. Пути совершенствования малорасходных турбин конструкции ЛПИ [Текст] / Н.А. Забелин, А.А. Себелев, М.В. Смирнов // Мат-лы всероссийской конф. «Изобретатели в инновационном процессе России»: Тез. докл. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2014. – С. 73–76.
4. Фершалов Ю.Я. Влияние конструктивных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней / Ю.Я. Фершалов, И.Н. Ханькович, А.Н. Минаев, Б.Я. Карастелёв, Ю.В. Якубовский // Научное обозрение. – 2012. – № 5. – С. 440–450.
5. Кузнецов Ю.П. Создание неавтономных турбоприводов на базе синтеза высокоэффективных микротурбин различных кинематических схем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1995. – 35 с.
6. Семашко П.В. Аэродинамическое совершенствование малоразмерных турбин с целью повышения эффективности пневмоприводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1994. – 17 с.
7. Кузнецов Ю.П. Установка для визуализации потока в элементах проточной части турбинной ступени [Текст] / Ю.П. Кузнецов, А.Б. Чуваков, Л.А. Бердников // Межвузовский сборник «Проблемы автоматизации исследований и проектных решений в судовой энергетике». – Горький, 1990. – С. 98–100.
8. Кузнецов Ю.П. Экспериментальная установка для исследования малоразмерных турбинных ступеней [Текст] / Ю.П. Кузнецов, А.Б. Чуваков // Известия вузов. Сер. «Машиностроение». – 2013. – № 4. – С. 58–64.
9. *FlowVision*. Руководство пользователя [Текст]. – М.: ТЕСИС, 2008. – 285 с.
10. Куклина Н.И. Особенности сравнения физического и численного экспериментов [Текст] / Н.И. Куклина, А.А. Себелев, М.В. Смирнов, Г.Л. Раков // Мат-лы XLIII научно-практ. конф. с междунар. участ. «Неделя науки СПбПУ»: тез. докл. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2015. – С. 104–107.