

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,  
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ  
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕТОК ПРОФИЛЕЙ  
С БОЛЬШОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ВОКРУГ ПРОФИЛЯ**

© 2022 г. Н. Г. Родионов\*

*Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана  
(Национального исследовательского университета), ул. Баженова, д. 2, г. Калуга, 248000 Россия*

\*e-mail: ngr-energo@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.02.2021 г.

После доработки 02.03.2021 г.

Принята к публикации 17.03.2021 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований плоских турбинных решеток профилей, выполненных на паровом стенде. Отрабатывались решетки с одним и тем же профилем, обладающим повышенным значением циркуляции вектора скорости вокруг профиля, а также с модификациями исходного профиля. Углы входа/выхода парового потока для решеток профилей составляют около  $50^\circ/14^\circ$ , длина лопаток равна 100 мм, хорда профиля – 40.64 мм. Продувки решеток проведены при  $Re > 4 \times 10^5$ . Исследованы решетки профилей С-13ГМ в широком диапазоне изменения относительного шага профилей 0.55–0.98 и числа Маха  $M \approx 0.5$ –1.1. Исходный профиль близок по конфигурации к известному профилю типа С-5515А МЭИ. Определены оптимальные значения относительного шага профилей в решетке в зависимости от числа Маха. Выявлено существование двух минимумов потерь энергии в зависимости от относительного шага профилей такого типа в решетке. Предложены некоторые технические решения по снижению суммарных потерь энергии в решетке профилей путем конструктивного воздействия на поток пара. Исследовано влияние углов атаки на потери энергии в решетке профилей с вихревой камерой на профиле, а также без нее. Показано влияние изменения некоторых геометрических и расходных параметров в решетках профилей на потери энергии пара при течении в межлопаточном канале. Профилированная щель у концов лопаток, а также двухрядная решетка увеличивают потери энергии. Вихревая камера, выполненная на выпуклой части профиля, снижает суммарные потери энергии в решетке примерно на 0.5–1.0% при  $M = 0.8$ –0.9, почти на 3% при  $M = 1.0$ . На коротких лопатках снижение суммарных потерь энергии решетки может достигать приблизительно 4%. На основе геометрического подобия контурам тела дельфина и методов сглаживания профилей изготовлены и испытаны турбинные профили, которые показали высокие газодинамические качества. Решетки, сконструированные из профилей такого типа, работают эффективно, особенно на влажном паре.

*Ключевые слова:* турбина, решетки профилей, потери энергии, экспериментальные исследования, воздействия на поток, лопатки турбины, межлопаточный канал, вихревая камера

**DOI:** 10.1134/S0040363621110035

Особую значимость для совершенствования турбин имеют экспериментальные исследования решеток профилей с использованием макро- и микровоздействий на поток в межлопаточных каналах для снижения потерь энергии. Наиболее достоверную информацию о газодинамических характеристиках решеток профилей, а также турбинных ступеней можно получить с помощью продувок этих объектов на экспериментальных стендах. При этом результаты продувок на воздушных и паровых стендах могут заметно различаться [1].

**ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА  
И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Далее приведены результаты экспериментальных работ по снижению потерь энергии в плос-

ких решетках профилей. Исследуемые профили применяются в проточной части турбин российского производства. Исходным профилем является профиль С-13ГМ с хордой  $b = 40.64$  мм, углами входа потока пара в решетку  $\alpha_0 = 50^\circ$  и выхода из решетки  $\alpha_1 = 14^\circ$ , близкий по конфигурации к профилю С-5515А МЭИ. Он имеет повышенное значение циркуляции вектора скорости вокруг профиля, что увеличивает его подъемную силу, и особенно эффективен для ступеней с пониженными скоростными характеристиками  $u/c'_0$  (здесь  $u$  – переносная скорость или окружная составляющая скорости потока;  $c'_0$  – теоретическая скорость потока при адиабатном расширении в решетке профилей). Но в таких турбинных решетках возникают повышенные профильные и концевые

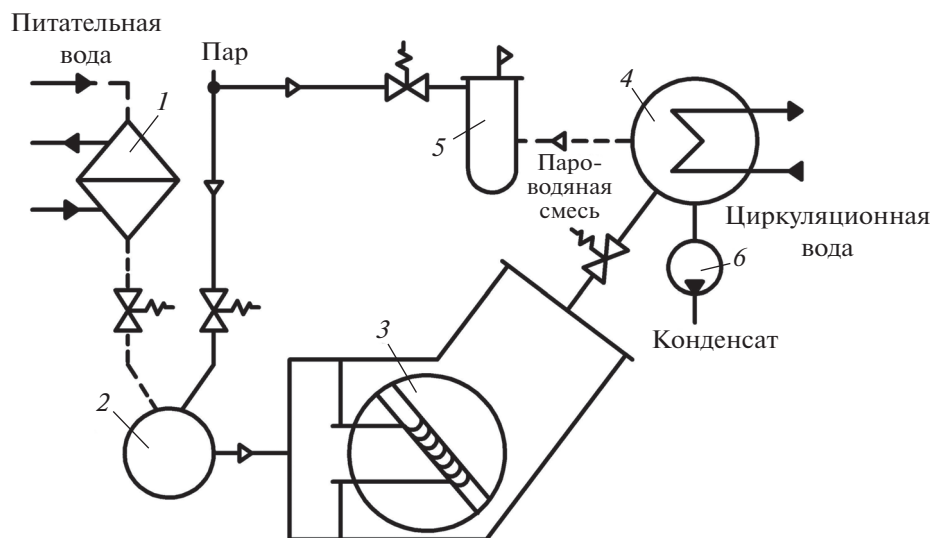


Рис. 1. Принципиальная схема стенда для продувок решеток профилей.

1 – теплообменник; 2 – блок подготовки рабочего тела; 3 – рабочая камера с объектом продувок; 4 – конденсатор; 5 – паровой эжектор; 6 – конденсатный насос

потери энергии из-за большого угла поворота потока в межлопаточном канале.

Изначально информация о газодинамических характеристиках решеток с профилями С-13ГМ была оценена расчетным путем и не была достаточно полной. При проведении экспериментальных исследований требовалось детально изучить газодинамические характеристики этих решеток и найти оптимальные значения относительного шага и числа Маха, а также любыми приемлемыми способами снизить потери энергии в них. Поставленные задачи решались экспериментальными методами при продувках плоских решеток на паровом стенде. Частично результаты этих исследований опубликованы ранее в [2–4], а также упомянуты в [1].

Оборудование стенда позволяло выполнять продувку плоских решеток профилей в крупном масштабе в широком диапазоне значений числа Маха ( $M = 0.5–1.0$ ) при критерии Рейнольдса  $Re > 4 \times 10^5$ . В критериях подобия определяющим геометрическим размером была выбрана хорда профиля, определяющей температурой – температура пара на входе в решетку. Принципиальная схема стенда показана на рис. 1.

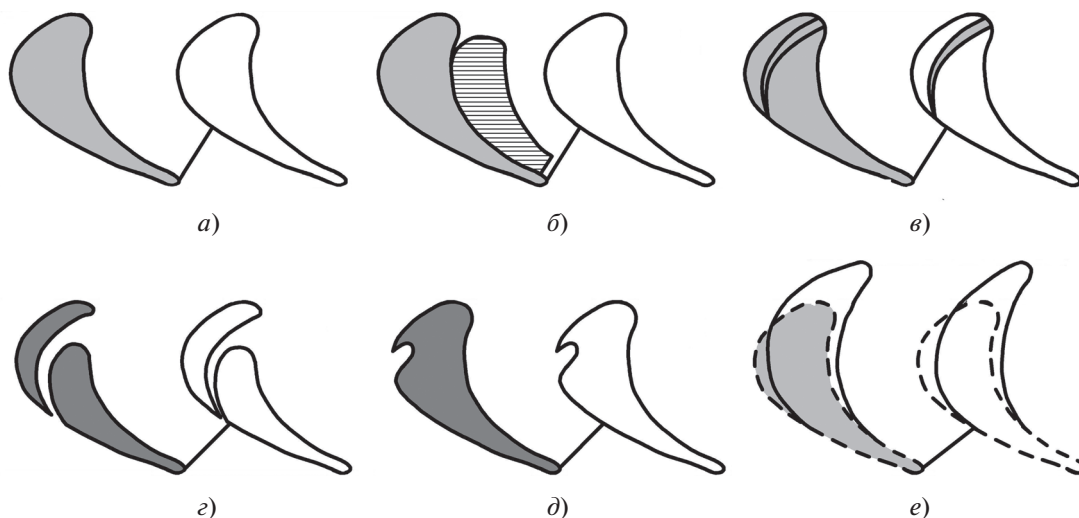
На вход в решетки профилей поступает слабо перегретый пар абсолютным давлением, близким к атмосферному. Параметры пара перед решетками профилей в опытах поддерживались постоянными. Требуемые режимы течения пара обеспечивались соответствующими изменениями вакуума в стендовом конденсаторе и работой парового эжектора и регулировочной задвижкой, установленной на выхлопном трубопроводе стенда. Плоские ре-

шетки профилей формировали из семи или восьми лопаток длиной 100 мм при  $L/b = 2.46$  (здесь  $L$  – длина лопатки) в зависимости от относительного шага профилей. Измерения статического и полного давлений при traversировании потока за решетками производили с помощью пневмометрических зондов в двух соседних каналах, расположенных в средней части решеток. Для перемещения зондов применяли координатник и систему, оснащенную шаговыми электроприводами. Для измерения углов парового потока на выходе из отдельных решеток использовали трехканальный зонд.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕШЕТОК ПРОФИЛЕЙ

Постановка задачи исследований решеток, выполненных на базе профилей типа С-13ГМ, состоит из начальной и поисковой частей. Начальная часть экспериментальных исследований направлена на выявление газодинамических характеристик решеток, составленных из профилей С-13ГМ. При этом варьировались значения  $t/b$  (здесь  $t$  – шаг профилей в решетке) и  $M$ , а также определялись оптимальные значения  $t/b$  в зависимости от  $M$ . Для оценок распределения давлений по контуру профиля выполняли его дренирование. Полученные результаты продувок использовали при формировании задач последующих исследований.

Поисковая часть исследований намного сложнее начальной. Требовалось найти способы воздействия на течение пара в межлопаточных каналах, уменьшающих потери энергии в решетке профилей при оптимальных значениях  $t/b$  и  $M$ .



**Рис. 2.** Схемы межлопаточных каналов в исследованных решетках профилей с исходными профилями С-13ГМ (а); с профилированной впадиной на поверхности бандажной пластины (б); с профилированными щелями в концевой части лопаток (в); двухрядной решетки профилей, созданных на основе С-13ГМ (г); с вихревой камерой на выпуклой части профиля (д); с “дельфинообразными” профилями (е)

В литературе практически отсутствует информация по эффективности конструктивных воздействий на поток в межлопаточных каналах применительно к решеткам профилей типа С-13ГМ с большими значениями циркуляции вектора скорости вокруг профиля. В поисковой части исследований были использованы принципы некоторых известных методов макро- и микровоздействий на поток в межлопаточных каналах, а также новые идеи, которые не были известны ранее в практике создания решеток профилей.

На рис. 2 показаны схемы межлопаточных каналов в исследованных решетках профилей. Продувки решеток профилей были проведены на основе исходного профиля С-13ГМ и его модификаций при следующих условиях:

Длина профилей, мм .....	100
Хорда $b$ , мм .....	40.64
Угол, град:	
установки профиля в решетке $\alpha_y$ .....	52
входа пара в решетку $\alpha_0$ .....	50
выхода пара из решетки $\alpha_1$ .....	14
Оптимальный шаг профилей $t/b$ .....	0.83
Число Маха $M$ .....	0.5–1.1
Критерий Рейнольдса $Re$ .....	Более $4 \times 10^5$

Были выполнены опыты с изменением углов атаки для профилей с вихревыми камерами, а также без них, с короткими лопатками  $L/b = 0.5$  и варьированием глубины вихревой камеры. При обработке опытных данных использовали типовые методики, в частности [5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

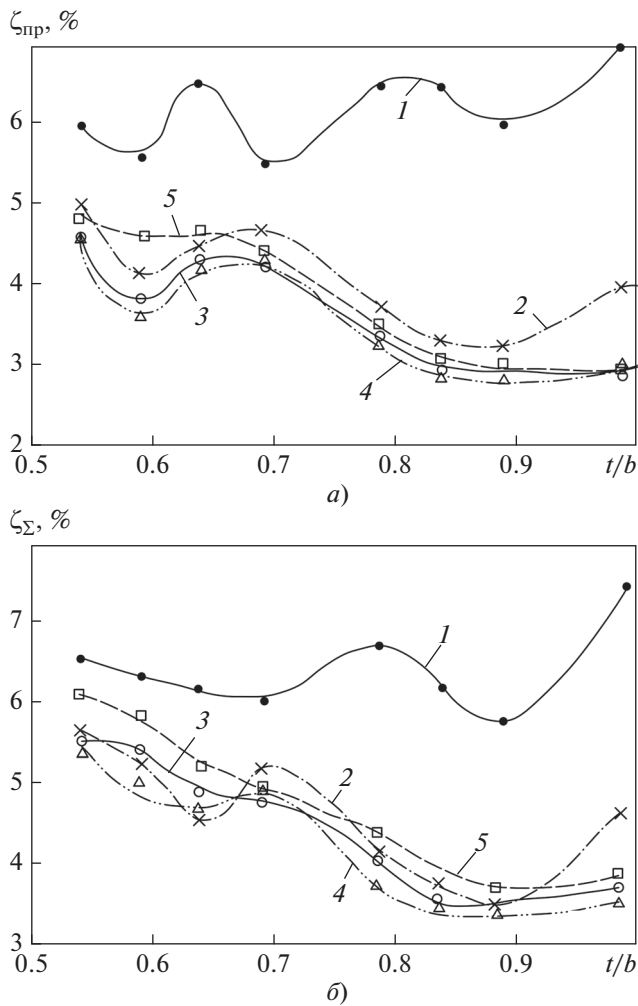
### Исходные решетки профилей С-13ГМ

На рис. 3 показаны зависимости профильных  $\zeta_{пр}$  и суммарных  $\zeta_{\Sigma}$  потерь энергии в решетках профилей С-13ГМ при варьировании значений  $t/b$  и  $M$ .

Для решеток профилей существуют минимумы профильных потерь энергии при значениях  $t/b$  0.59 и 0.83–0.98 для  $M = 0.6–0.9$ . Минимальные профильные потери энергии 2.7–2.8% обеспечивают решетки профилей С-13ГМ при  $t/b = 0.83–0.98$  для  $M = 0.7–0.8$ . При  $M = 1.0$  возникают три минимума  $\zeta_{пр}$  при значении  $t/b$ , равном 0.59, 0.70, 0.89. Режим работы при  $M = 1.0$  не является характерным для решеток с такими профилями в составе турбинных ступеней.

Суммарные потери энергии в решетках профилей С-13ГМ изменяются примерно по аналогичным зависимостям, что и профильные, но с учетом концевых потерь (см. рис. 3). Также имеются два минимума суммарных потерь энергии 4.6 и 3.3% при значениях  $t/b$ , равных 0.64, 0.83 для  $M = 0.7–0.8$ . Существование двух минимумов у зависимостей  $\zeta = f(t/b, M)$  доказано и в опытах на решетках с другими профилями С-13Г, в которых  $b = 47$  мм,  $L/b = 2.13$ ,  $\alpha_0 = 50^\circ$ .

Наличие двух минимумов профильных и суммарных потерь энергии в зависимости от  $t/b$  является необычным результатом исследования. Как правило, при проектировании выбирают оптимальные значения  $t/b$  в решетках, исходя из представлений монотонного изменения зависимости  $\zeta_{пр} = f(t/b, M)$  [1, 5, 6] с выраженным минимумом, которые получены экспериментальным путем



**Рис. 3.** Зависимость профильных (а) и суммарных (б) потерь энергии в решетках с исходным профилем С-13 ГМ от  $t/b$ .  
 $M$ : 1 – 1.0; 2 – 0.9; 3 – 0.8; 4 – 0.7; 5 – 0.6

либо на основе полуэмпирических обобщений. В частности, для решеток с профилями С-5515А МЭИ, близкими к С-13ГМ, в [5] рекомендуются  $M = 0.70–0.95$  и оптимальные  $t/b = 0.72–0.87$ , которые не соответствуют результатам, представленным на рис. 3. Наличие одного оптимального значения  $t/b$  в [5], возможно, объясняется малым количеством экспериментальных точек, по которым строились зависимости потерь энергии от  $t/b$ . В [5] количество таких точек составляет всего три-четыре. На рис. 3 анализируемые графические зависимости построены по восьми точкам для каждого числа Маха в пределах  $M = 0.6–1.0$ . Полученные данные, частично представленные ранее в [2], показали, что следует осторожно относиться к существующим рекомендациям по выбору значения  $t/b$  для решеток с большими углами поворота потока в межлопаточных каналах.

### Решетки с макро- и микровоздействиями на поток в канале

Известные методы управления потоком [1, 7 и др.] с помощью тщательно подобранных изменений геометрических и расходных параметров позволяют уменьшать потери энергии в решетках профилей и турбинных ступенях. Для снижения потерь энергии в решетке с профилями С-13ГМ было принято решение формировать профилированные впадины максимальной глубиной 4.5 мм в межлопаточных каналах на основе рекомендаций [7]. Второе решение заключалось в использовании профилированной щели у конца лопатки. Продувки в опытах [7] проводили на воздухе с профилями, существенно отличающимися от С-13ГМ, при небольших числах Маха ( $M < 0.5$ ). Оптимально выполненные микровоздействия на поток (перегородки, уступы и выступы, ребра на профиле, щели у концов лопаток) могут обеспечить повышение КПД решеток профилей на 1.0–1.5%. Однако такие рекомендации сложно применить к решеткам профилей С-13ГМ при значительно больших числах Маха ( $M = 0.70–0.95$ ). Единичные продувки этих решеток профилей с впадиной на торцевой поверхности межлопаточного канала, а также со щелью у концов лопаток были выполнены для относительного шага профилей  $t/b = 0.83$  при достаточно высоких значениях  $M$  и дозвуковых скоростях потока.

На рис. 2, б глубина впадины в области входа потока в решетку нулевая, а на выходе она не доходит до горла канала на 2 мм. Впадина должна препятствовать перетеканию потока в пограничном слое от вогнутой поверхности профиля к выпуклой. При этом должны снижаться интенсивность вторичных течений и потеря энергии в межлопаточном канале [7].

Схема профилированной суживающейся щели показана на рис. 2, в. Вдвух части пара в зону вторичных течений при использовании внутренних ресурсов потока является “тонким механизмом” и требует тщательной отработки параметров. Начало щели шириной 2 мм выполнено на входной кромке профиля. Выходная часть щели шириной 0.8 мм не доходит до горла канала на 1.5 мм, выпуск пара из щели производится под небольшим углом к выпуклой поверхности профиля, высота щели составляет 15 мм. Выбор расположения начала щели на входной кромке профиля обусловлен стремлением снизить интенсивность и масштаб “подковообразного” вихря. Такой вихрь всегда развивается в двугранном угле при соединении конца лопатки с торцевой ограничивающей поверхностью [1]. По отпечаткам отложенной на бандажных пластинах был установлен размер “подковообразного” вихря перед профилем без щели, равный примерно 4 мм, который уменьшается до 1 мм при наличии щели.

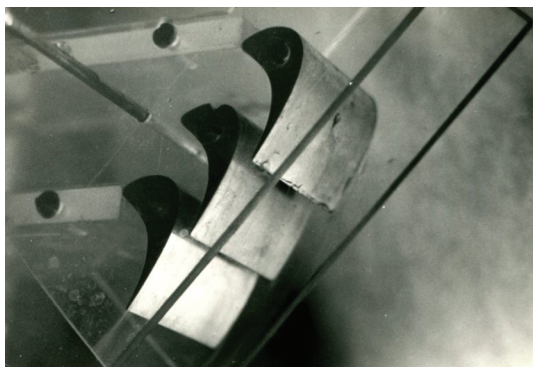


Рис. 4. Модель канала с прозрачными стенками

Анализ распределения потерь энергии по высоте решеток с исходным профилем, с впадиной в межлопаточном канале, со щелью у концов лопаток при  $t/b = 0.83$  и фиксированных значениях числа Маха показал, что микровоздействия слабо влияют на изменение потерь энергии. Впадина на торцевой поверхности межлопаточного канала снижает суммарные потери энергии на 0.2–0.5% при  $M = 0.6–0.9$  и на 1.5% при  $M = 1.0$ . Периферийная щель у концов лопаток, вероятно, сконструирована неоптимальной. Суммарные потери энергии в решетке со щелями у концов лопаток оказались выше на 0.4–0.5% при  $M = 0.65–0.85$  и ниже на 1.0–1.5% при  $M = 0.95–1.0$  по сравнению с решеткой с исходными профилями.

Согласно рекомендациям [8, 9] была исследована двухрядная решетка (см. рис. 2, *з*), созданная на основе исходного профиля С-13ГМ с  $t/b = 0.83$ . Опыты на двухрядной решетке выявили увеличение профильных и суммарных потерь энергии на 2–3% при  $M = 0.6–0.9$  по сравнению с исходной решеткой профилей С-13ГМ. Модификации решеток профилей с воздействием на расход потока в межлопаточном канале (см. рис 2, *в*, *з*) не дают

оснований для их применения в целях снижения потерь энергии.

Дальнейшую отработку конструкций впадин в межлопаточном канале, профилированной щели, двухрядной решетки не проводили. Они показали недостаточную эффективность по снижению суммарных потерь энергии.

*Решетки профилей с вихревыми камерами на выпуклой части профиля*

Поисковые исследования решеток профилей были выполнены при формировании вихревых камер на выпуклой части по всей длине профиля. Известно, что при неуправляемом отрыве потока от профиля возрастают потери кинетической энергии потока в межлопаточном канале [1]. Автор использовал идеи по управлению течением среды в каналах с отрывом потока, предложенные в [10, 11] не применительно к решеткам турбинных профилей.

В исследованиях было принято решение заранее вызывать искусственный отрыв пограничного слоя, не допуская его интенсивного развития и последующего крупномасштабного отрыва от поверхности профиля. Для этой цели были сделаны вихревые камеры на выпуклой части профиля С-13ГМ вблизи зоны максимальной кривизны, где происходит наибольший рост толщины пограничного слоя и возникает вероятность его отрыва от выпуклой поверхности профиля. Для реализации идеи были проведены специальные исследования на модели канала с прозрачными стенками, продуваемого воздухом (рис. 4). Принцип поиска места вероятного отрыва пограничного слоя от выпуклой части профиля с использованием данных, опубликованных в [12, 13], показан на рис. 5. Для поиска места вероятного отрыва пограничного слоя от профиля использовали также результаты дренирования профиля для одного межлопаточного канала.

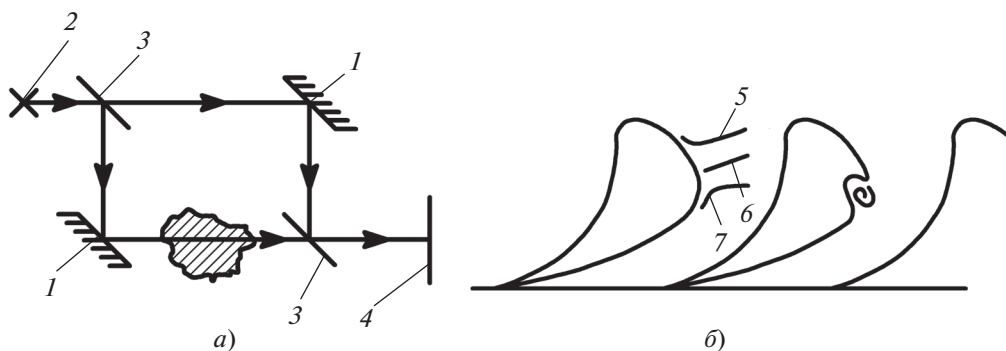


Рис. 5. Принцип поиска месторасположения вихревой камеры.

*а* – лазерный интерферометр; *б* – схема изолиний плотности потока в канале; 1 – зеркало; 2 – лазер; 3 – полупрозрачная посеребренная пластина; 4 – экран; 5–7 – изолинии

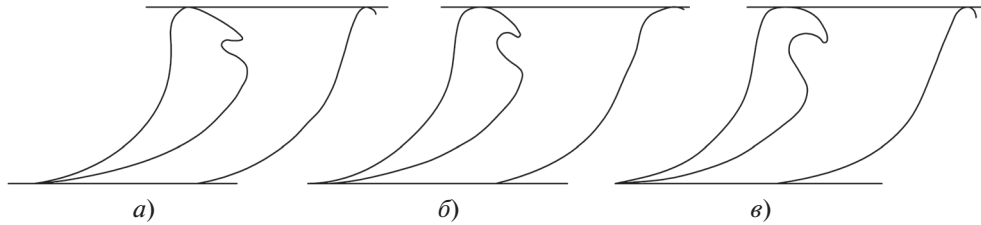


Рис. 6. Схемы межлопаточных каналов с вихревыми полостями на профилях.  
 $\delta$ , мм: а – 1.2; б – 3.0; в – 6.0

В межлопаточных каналах модели проходит поток воздуха. Область потока сканируется источником монохроматического излучения 2, полупрозрачные пластины 3 пропускают 50% лазерного излучения, а 50% излучения отражают. На экране 4 формируется интерференционная картина изолиний равной плотности в потоке воздуха, форма которых изменяется вблизи выпуклой поверхности профиля (см. рис. 5, б). Знак производной плотности потока  $\rho$  по контуру профиля  $s$

изменяется от линии 5 к линии 7. Там, где  $dp/ds = 0$  (линия б), предположительно начинается зарождение отрыва пограничного слоя от профиля. За линией б развивается и затем происходит крупномасштабный отрыв пограничного слоя от профиля. Чтобы устранить развитие и отрыв, на выпуклой части профиля С-13ГМ перед точкой на профиле, где  $dp/ds = 0$ , формируют камеру (полость, углубление), в которую “скатывается” образовавшийся пограничный слой (см. рис. 5, б). Вихревая камера в виде цилиндрической поверхности, вырезанная профильной фрезой по всей длине лопатки, плавно переходит к основному контуру выпуклой части профиля. Были исследованы решетки профилей с камерами шириной  $\delta$  (рис. б).

На рис. 7 показаны зависимости потерь энергии при различных значениях  $\delta$  и  $M$ . Выигрыш/проигрыш по профильным и суммарным потерям энергии определяется их сопоставлением в виде  $\Delta\zeta = \zeta_{\delta \neq 0} - \zeta_{\delta = 0}$  (здесь  $\zeta_{\delta \neq 0}$ ,  $\zeta_{\delta = 0}$  – потери энергии в решетке с вихревыми камерами и без них).

Из анализа результатов опытов следует, что оптимальная ширина вихревой камеры составляет 3 мм. Использование вихревой камеры может обеспечить снижение суммарных потерь в решетке профилей на 0.8–1.0% при  $M = 0.8–0.9$  и примерно на 2.7% при  $M = 1.0$ .

Вихревая камера на профиле препятствует развитию крупномасштабного отрыва потока от его выпуклой поверхности, о чем косвенно свидетельствует анализ следов потока на рис. 8. Вихревая камера выполнена очень большой, не оптимальной ширины  $\delta = 6$  мм при  $\alpha_0 = 50^\circ$ . Отложения на ограничивающей пластине показывают “скатывание” пограничного слоя и части пара в пространство вихревой камеры. Сброс части пара из вихря в поток уменьшает толщину пограничного слоя на профиле, на котором после вихревой камеры происходит зарождение и развитие нового пограничного слоя. При этом глобальный отрыв потока в межлопаточном канале от выпуклой части профиля удается устранить. В пограничном слое на торцевой пластине от вогнутой части про-

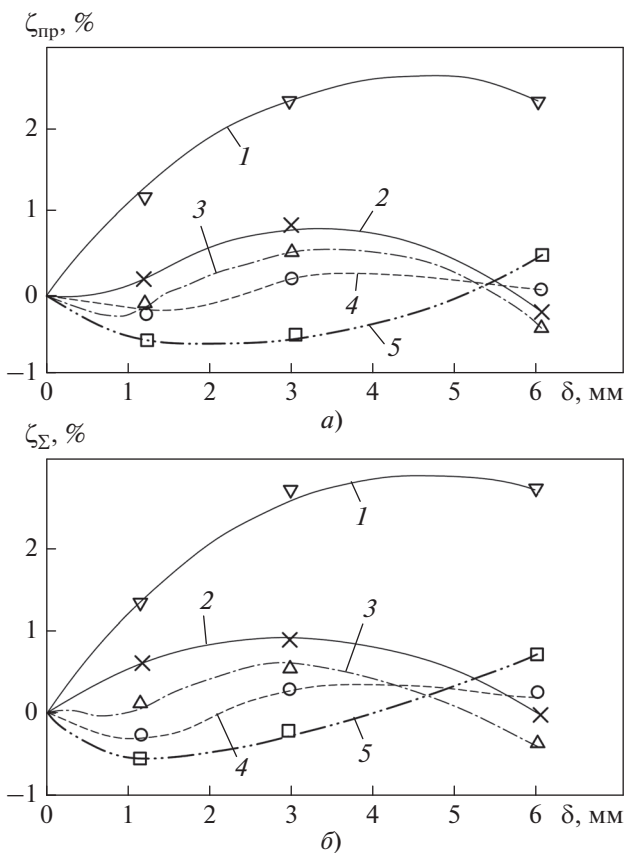
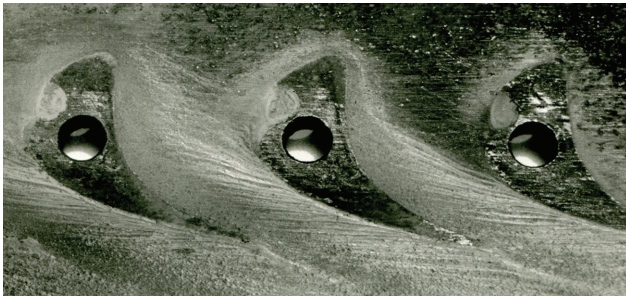
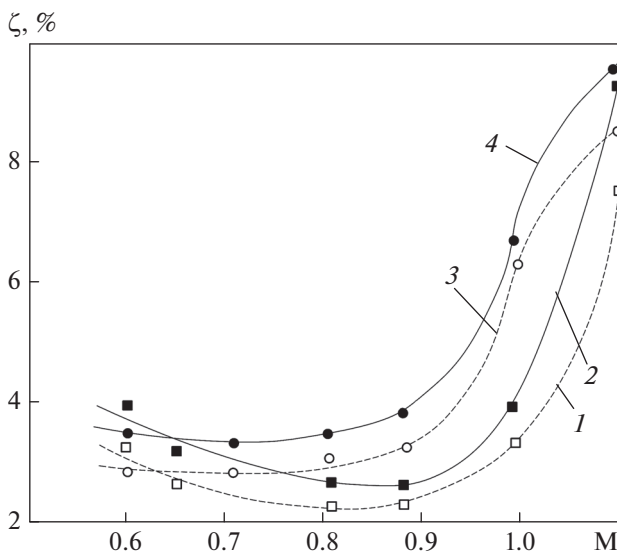


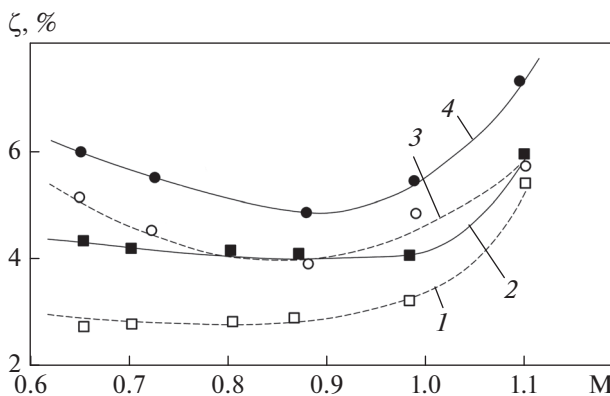
Рис. 7. Зависимость снижения профильных (а) и суммарных (б) потерь энергии в решетках профилей С-13ГМ с вихревыми камерами от ширины камеры при  $L/b = 2.46$ ,  $t/b = 0.84$ ,  $\alpha_0 = 50^\circ$ .  
 $M$ : 1 – 1.0; 2 – 0.9; 3 – 0.8; 4 – 0.7; 5 – 0.6



**Рис. 8.** Вид ограничивающей пластины для решетки профилей С-13ГМ с вихревыми камерами шириной 6 мм



**Рис. 9.** Зависимости профильных (1, 3) и суммарных (2, 4) потерь энергии в решетках профилей с вихревыми камерами (1, 2) и без них (3, 4) от числа Маха



**Рис. 10.** Зависимости профильных (1, 3) и суммарных (2, 4) потерь энергии в решетках профилей с вихревыми камерами (1, 2) и без них (3, 4) с короткими лопатками от числа Маха

филя к выпуклой заметны следы вторичных течений пара (см. рис. 8).

На рис. 9 для сравнения показаны профильные и суммарные потери энергии в решетках профилей С-13ГМ с вихревыми камерами и без них в зависимости от  $M$ . Параметры исследуемой решетки составляли:  $L/b = 2.46$ ,  $t/b = 0.84$ ,  $\delta = 3$  мм,  $\alpha_0 = 50^\circ$ . При  $M > 0.65$  профильные и суммарные потери энергии в решетке с вихревыми камерами становятся меньше, чем в решетке с исходным профилем.

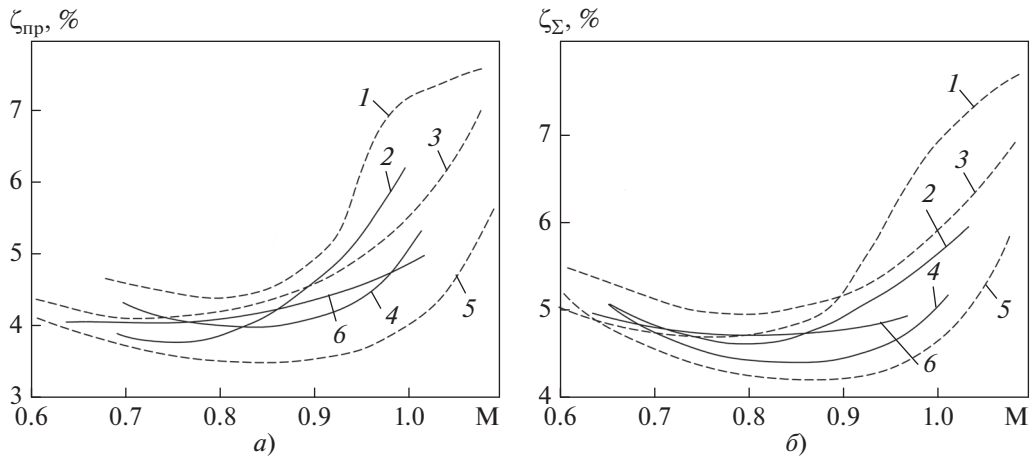
Результат увеличения КПД решетки с вихревой камерой был проверен на решетке профилей С-13ГМ с короткими лопатками при  $L/b = 0.5$  и неоптимальном значении  $t/b = 0.69$ . Зависимости профильных и суммарных потерь энергии приведены на рис. 10. Во всем исследованном диапазоне режимов работы решетка с вихревыми камерами на профилях при  $M = 0.65-1.10$  обеспечивает снижение потерь энергии не менее чем на 1% в зависимости от числа Маха.

На рис. 11 показаны результаты опытов по влиянию угла входа потока на потери энергии. Решетки профилей для опытов были выбраны на основе исходных профилей С-13ГМ с вихревыми камерами и без них. Параметры исследованных решеток составляли:  $L/b = 2.46$ ,  $t/b = 0.69$  (неоптимальный),  $\alpha_0 = 52^\circ$ ,  $\delta = 3$  мм (для решетки с вихревой камерой), изменение угла входа потока в решетку  $\Delta\alpha_0 = \pm 10^\circ$ . Отмечена меньшая чувствительность изменения КПД решетки с вихревыми камерами на профилях при изменениях угла входа потока в решетку. При положительном угле атаки ( $\alpha_0 = 40^\circ$ ) профильные и суммарные потери энергии в решетке с вихревыми камерами на профилях снижаются. При отрицательном угле атаки ( $\alpha_0 = 60^\circ$ ) профильные и суммарные потери энергии в решетке с вихревыми камерами на профилях становятся больше, чем в решетке без вихревых камер.

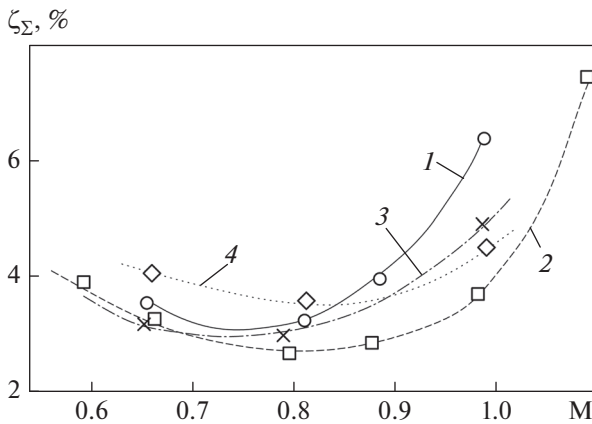
*Сравнение решеток профилей с макро- и микровоздействиями на поток*

Выше были рассмотрены результаты исследований решеток профилей с исходным профилем С-13ГМ, а также с модификациями профилей. На рис. 12 для сопоставления показаны суммарные потери энергии в решетках с исходным профилем, с впадиной в межлопаточном канале, со щелью у концов лопаток, с вихревой камерой на профиле  $\delta = 3$  мм при  $L/b = 2.46$ ,  $t/b = 0.83$  и  $0.84$ ,  $\alpha_0 = 50^\circ$ .

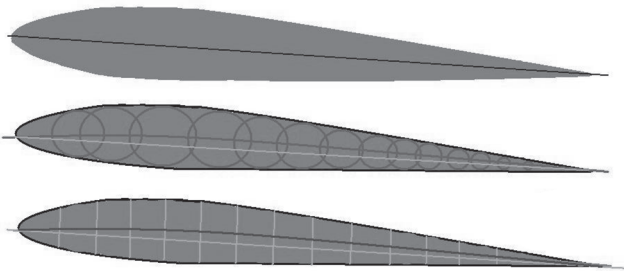
Решетка с вихревыми камерами на профилях обладает самыми лучшими газодинамическими качествами при  $M > 0.65$ . По сравнению с исходной решеткой можно получить снижение суммарных потерь энергии на 1.0–2.7% при  $M = 0.9-$



**Рис. 11.** Зависимости профильных (а) и суммарных (б) потерь энергии в решетках профилей с вихревой камерой (2, 4, 6) и без нее (1, 3, 5) от числа Маха.  
 $\alpha_0$ , град: 1, 2 – 40; 3, 4 – 50; 5, 6 – 60



**Рис. 12.** Зависимость суммарных потерь энергии в решетках с профилем С-13ГМ (1), с вихревой камерой на профиле (2), с впадиной в межлопаточном канале (3), со щелью у концов лопаток (4) от числа Маха



**Рис. 13.** Ламинаризованные профили NASA

1.0. Минимум суммарных потерь при этом составляет около 2.7% для диапазона  $M = 0.8-0.9$ . Решетка с впадиной на торцевой поверхности в межлопаточном канале обеспечивает снижение суммарных потерь энергии на 0.2–0.4% при  $M =$

$= 0.8-0.9$  и около 1.5% при  $M = 1.0$ . В решетке со щелью у концов лопаток увеличение потерь энергии составляет примерно 0.5% при  $M = 0.65-0.82$ . При  $M \approx 0.9$  такая решетка практически равноценна исходной по газодинамическим качествам, а при  $M \approx 1.0$  потери энергии в ней снижаются на 1.7%.

#### Решетки с “дельфинообразными” профилями

Конструирование решеток профилей может выполняться различными методами [1, 5, 7, 14]. В практике российских проектных организаций обычно используют лемнискатный метод построения решеток с дозвуковыми профилями [1, 5] и другие методы образования профилей. При этом применяются прикладные пакеты программ профилирования лопаточных аппаратов с учетом пространственного течения потока для решения прямых и обратных задач проектирования. Многие зарубежные организации пользуются методами с образованием ламинаризованных профилей NASA (рис. 13) или английских профилей [14]. Построение профиля сводится к соответствующему изгибу средней линии под нужные углы входа/выхода потока с последующим распределением толщины профиля по таблицам толщин ламинаризованных профилей для соответствующих координат средней линии.

Автор предложил принцип создания дозвуковых турбинных профилей на основе подобия их конфигурации телам морских животных, обладающих высокими скоростями движения [15], выработавшимися в процессе их эволюции. К числу быстроходных морских обитателей относятся некоторые дельфины: афалина, касатка, белобочка (скорость 12–16 м/с) – и рыбы: тунцовые (скорость более 30 м/с), акулы, меч-рыба, парусник



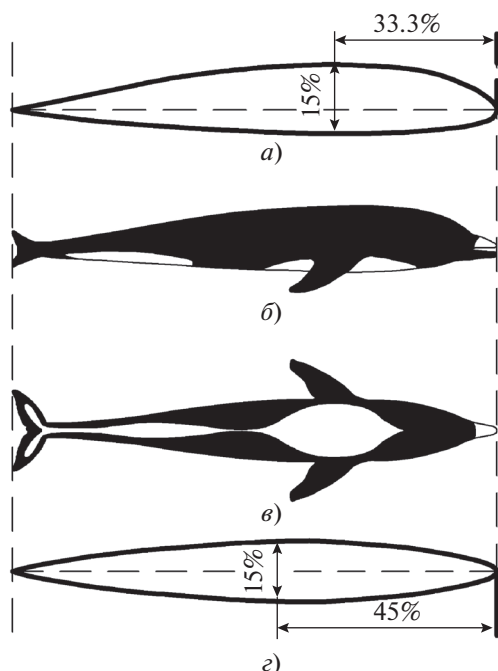


Рис. 14. Профили ЦАГИ (а), дельфина (б, в) и НАСА (г)

и др. Установлен факт гидродинамического сходства профилей тела высокоскоростных китообразных и рыб с расчетными аэродинамически совершенными профилями.

На рис. 14 приведены профили дельфина (касатки) и разработанные в ЦАГИ [15] и в НАСА. На основе представлений о форме тел дельфина и информации [14, 15], а также разработок автора по конструированию турбинных профилей, частично упомянутых в [7], спроектирован “дельфинообразный” профиль (см. рис. 2, е).

В качестве базовой основы выбран профиль С-13ГМ, модифицированный по подобию телу дельфина. Модифицированные профили сглаживались по специальной технологической программе. Скелетная линия профиля подстраивалась под необходимые углы входа/выхода потока в решетке. Вогнутая и выпуклая части профиля повторяли форму очертаний изогнутого тела дельфина. В другой группе профилей повторялись очертания изогнутого тела тунца. Проведены единичные испытания [4] на паровом стенде продувок решеток с “дельфинообразными” профилями при  $t/b = 0.75$ ,  $\alpha_0 = 50^\circ$  для  $M = 0.6-1.0$ . Решетка с “дельфинообразными” профилями обеспечивает снижение профильных и суммарных потерь энергии на 0.2–0.5% по сравнению с решеткой профилей С-13ГМ.

В газодинамической лаборатории МЭИ была проведена серия детализированных опытов на плоских сопловых решетках с “дельфинообразными” профилями под руководством докт. техн.

наук профессора М.Е. Дейча. Решетки такого типа обеспечивают заметное снижение потерь кинетической энергии, они особенно эффективно работают на влажном паре [1]. Эксперименты в МЭИ проведены для некоторых сопловых решеток с “дельфинообразными” профилями с углом входа потока  $90^\circ$ . Параметры решеток варьировались следующим образом:  $\alpha_1 = 12^\circ-20^\circ$ ,  $t/b = 0.62-0.75$ , пар перед решеткой – слабо перегретый либо влажный. В решетках с “дельфинообразными” профилями лучше дробится влага, стекающая с поверхности профиля, уменьшается угол атаки крупнодисперсных капель, натекающих на рабочую решетку.

### ВЫВОДЫ

1. При использовании впадин в межлопаточном канале при оптимальных относительном шаге профилей и числах Маха снижаются суммарные потери энергии в решетке профилей примерно на 0.5%. Устройство профилированной щели у концов лопаток увеличивает суммарные потери энергии до 0.5% при  $M = 0.65-0.80$ , но снижает их на 1.5% при  $M = 1.0$ . Двухрядная решетка профилей проигрывает в экономичности исходной решетке профилей С-13ГМ, суммарные потери энергии в ней больше на 2–3% при  $M = 0.6-0.9$ .

2. Наличие вихревой камеры на выпуклой части профиля обеспечивает снижение суммарных потерь в решетке на 0.5–1.0% при  $M = 0.8-0.9$  и примерно на 2.5% при  $M = 1.0$ . Решетки профилей такого вида имеют минимальные профильные потери 2.2% при  $M = 0.75-0.90$  и суммарные потери энергии 2.7% при  $M = 0.8-0.9$ . Выигрыш в экономичности для решетки с вихревыми камерами на профилях получается при  $M > 0.65$ . Повышение КПД решетки обеспечивается в основном за счет снижения профильных потерь энергии на относительно длинных и коротких лопатках. Такие решетки менее чувствительны к изменениям угла атаки. При положительных углах атаки потери энергии в решетке снижаются, при отрицательных углах атаки – возрастают.

3. Решетки, выполненные с “дельфинообразными” профилями, снижают потери кинетической энергии в потоке и особенно эффективны при работе во влажном паре.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейч М.Е. Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат, 1996.
2. Родионов Н.Г., Дахнович А.А., Голдин А.С. Исследование турбинных решеток профилей с вихревыми полостями на профилях // Теплоэнергетика. 1995. № 1. С. 72–74.
3. Родионов Н.Г., Голдин А.С. Результаты исследования турбинных решеток с вихревыми полостями на

- спинках профилей // Материалы 4-й Всерос. межотраслевой НТК “Актуальные проблемы морской энергетики”. СПб.: СПб ГМТУ, 2015. С. 116–118.
4. Родионов Н.Г. Оборудование для экспериментальных исследований проточных частей паровых турбин на водяном паре // Материалы 9-й Междунар. НТК. СПб.: СПбГМТУ, 2020. С. 230–234.
  5. Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. Атлас профилей решеток осевых турбин. М.: Машиностроение, 1965.
  6. Мухтаров М.Х., Кричакин В.И. Методика оценки потерь в проточной части осевых турбин при расчете их характеристик // Теплоэнергетика. 1965. № 7. С. 76–79.
  7. Топунов А.М., Тихомиров Б.А. Управление потоком в тепловых турбинах. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979.
  8. Осинкин В.Н., Митюшкин Ю.И. Исследование потока за плоской двухрядной решеткой профилей // Труды ЛКИ. 1975. Вып. 101. С. 71–77.
  9. Осинкин В.Н. Исследование дозвуковых турбинных ступеней с двухрядными сопловыми решетками: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛКИ, 1978.
  10. Чжен П. Управление отрывом потока: пер. с англ. М.: Мир, 1979.
  11. Чжен П. Отрывные течения: пер. с англ. В 3 т. М.: Мир, 1972–1973.
  12. Справочные материалы. Оптико-физические методы и средства исследований в экспериментальной газодинамике. М.: ГОНТИ-1, 1989.
  13. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука, 1975.
  14. Хорлокк Дж.Х. Осевые турбины (газовая динамика и термодинамика): пер. с англ. М.: Машиностроение, 1972.
  15. Сочивко В.П. Очерки бионики моря. Л.: Судостроение, 1968.

## Experimental Studies of Airfoil Cascades with High Velocity Vector Circulation around the Airfoil

N. G. Rodionov\*

*Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Kaluga, 248000 Russia*

*\*e-mail: ngr-energo@yandex.ru*

**Abstract**—The results from experimental studies of flat turbine airfoil cascades carried out at a steam setup are presented. Cascades having the same airfoil featuring an increased velocity vector circulation rate around the airfoil and also ones with modified initial airfoil versions were considered. The steam flow inlet and outlet angles for the airfoil cascades are approximately  $50^\circ/14^\circ$ ; the blade length is 100 mm, and the airfoil chord is 40.64 mm. The cascade blowing experiments were carried out at  $Re > 4 \times 10^5$ . The cascades of S-13GM airfoils were studied in a wide airfoil relative pitch variation range of 0.55–0.98 and Mach number variation range  $M \approx 0.5$ –1.1. The initial blade airfoil had a configuration close to the well-known S-5515A airfoil developed at the Moscow Power Engineering Institute (MPEI). The optimal values of the airfoil relative pitch in the cascade versus the Mach number have been determined. It has been found that there are two energy loss minimums depending on the relative pitch of such airfoils in the cascade. Some technical solutions are suggested for reducing the total energy losses in the cascade of airfoils through adjusting the steam flow by design measures. The effect of incidence angles on the energy losses in the cascade of airfoils with and without a vortex chamber on the airfoil is studied. The effect the change in some geometrical and flowrate parameters in airfoil cascades has on the steam energy losses during the flow in the interblade channel is shown. A profiled slot at blade tips and also a two-row cascade increase the energy losses. A vortex chamber made on the airfoil convex part decreases the total energy losses in the cascade by approximately 0.5–1.0% with  $M = 0.8$ –0.9 and by 3% with  $M = 1.0$ ; the decrease of total energy losses in the cascade with short blades may reach approximately 4%. Based on the geometrical similarity to the dolphin body outlines and profile smoothing methods, turbine blade airfoils have been fabricated and tested, which have shown high gas dynamic properties. The cascades assembled of airfoils of such type such show efficient performance, especially in operating on wet steam.

*Keywords:* turbine, cascades of airfoils, energy losses, experimental studies, flow alteration, turbine blades, interblade channel, vortex chamber