

## **Применение нейронной сети для повышения точности модели профильных потерь в турбинных решетках**

Докладчик: Волков Андрей Александрович.  
Структурное подразделение: СГК,  
отдел теплофизики и газодинамики (КО-5)  
Начальник бригады лопаточных машин

апрель 2023



Рисунок из статьи «От математической модели ГТД к его Цифровому двойнику»

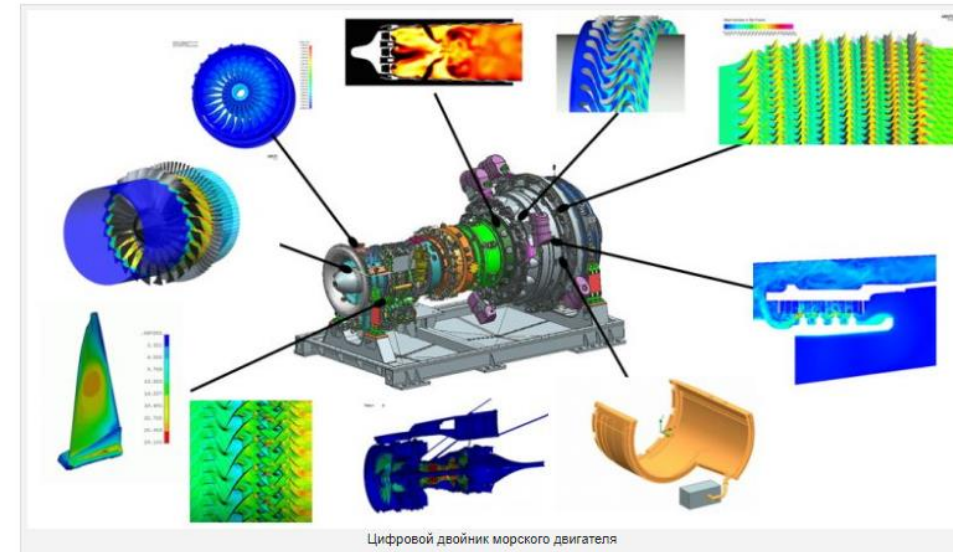


Рисунок с сайта «Газотурбинные технологии»

Снижение времени расчета и потребных ресурсов при увеличении точности модели цифрового двойника возможно при совершенствовании существующих 1D моделей в направлении увеличения их точности (малое расхождение с экспериментальными данными).

В данной работе представлено повышение точности модели профильных потерь в решетках турбины.

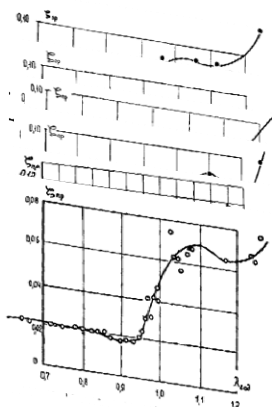
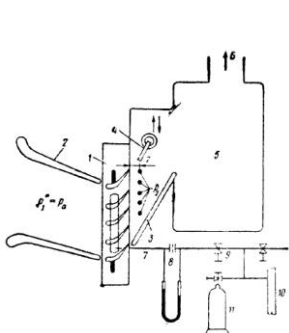
Время расчета 1D и 3D модели ступени турбины может отличаться в 60 раз и более в зависимости от имеющихся ресурсов и конфигурации модели.

**Повышение точности модели потерь позволит повысить точность результатов 1D расчета турбины, что в свою очередь повысит точность модели цифрового двойника с применением 1D модели турбины, поэтому это является актуальной задачей.**

Для оценки профильных потерь в решётках турбин, исключая 3D моделирование с учетом вязкости, существующие модели можно разделить на 2 класса.

### Статистические

(основаны на экспериментальных исследованиях множества решеток турбин)



Значения коэффициентов  $b_i$  и  $b_{ij}$  для статистических моделей  $\Delta z$  в относительных решетках

$i$	$b_i$	$b_{ij}$
1	-3.7000E-03	$b_{12}$
2	-8.0000E-02	$b_{13}$
3	3.4044E-03	$b_{14}$
4	-1.0700E-03	$b_{15}$
5	-5.1000E-03	$b_{16}$
6	-1.1000E-02	$b_{17}$
7	1.0000E-03	$b_{18}$
8	5.1100E-03	$b_{19}$
9	2.0010E-03	$b_{20}$
10	6.0020E-03	$b_{21}$
11	7.0010E-03	$b_{22}$
12	-3.8010E-03	$b_{23}$
13	-1.1000E-02	$b_{24}$
14	3.0040E-03	$b_{25}$
15	1.0010E-03	$b_{26}$
16	3.0040E-03	$b_{27}$
17	9.0010E-03	$b_{28}$
18	-1.0010E-03	$b_{29}$
19	-9.0010E-03	$b_{30}$
20	5.0010E-03	$b_{31}$
21	-1.0000E-02	$b_{32}$
22	7.0010E-03	$b_{33}$
23	7.0010E-03	$b_{34}$
24	-2.0000E-03	$b_{35}$
25	-6.0000E-03	$b_{36}$
26	3.0020E-03	$b_{37}$
27	1.0040E-02	$b_{38}$
28	-7.0040E-03	$b_{39}$
29	-4.0000E-02	$b_{40}$
30	-1.1010E-03	$b_{41}$
31	5.1010E-03	$b_{42}$
32	1.0040E-03	$b_{43}$
33	3.0040E-03	$b_{44}$
34	1.0000E-03	$b_{45}$
35	1.0010E-03	$b_{46}$
36	1.0010E-03	$b_{47}$

$$\Delta z = \sum_{i=1}^m b_i z_i$$

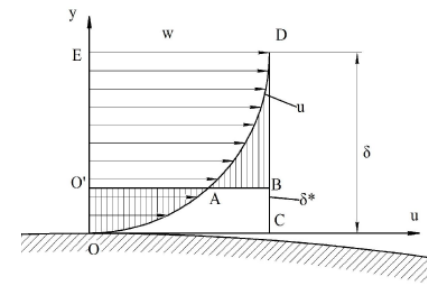
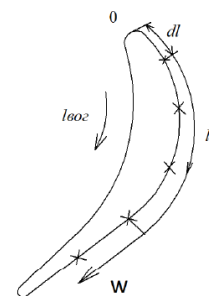
$$R = 0,86;$$

**Достоинства:** относительная простота применения

**Недостатки:** низкая точность

### Полуэмпирические

(расчёт пограничного слоя с применением эмпирических зависимостей + модель кромочных потерь)



$$\frac{\delta^{**}}{t} = \frac{0,036}{\text{Re}_2^{0,2} \left( \frac{W}{W_2} \right)^{3,3}} \left[ \int_0^{l/t} \left( \frac{W}{W_2} \right)^{3,86} \frac{dl}{t} \right]^{0,8}$$

$$\zeta_{mp} = 1 - \Psi_{mp}^2 \approx \frac{2(\delta_{cn}^{**} + \delta_{eoz}^{**})}{t \cdot \sin \beta_{2\gamma}}$$

**Достоинства:** точность лучше, чем у статистических моделей в виду учета особенностей профиля (кривизна)

**Недостатки:**

- ✓ сильная зависимость от эмпирических коэффициентов
- ✓ сложнее в реализации по сравнению с статистическими моделями

✓ Статистические модели не обеспечивали достаточной точности, поэтому применялись в основном только на этапах первоначального проектирования турбины: расчет по среднему диаметру.

✓ Недостаточная точность статистических моделей при использовании в рамках цифрового двойника приведет к неверному определению параметров турбины и двигателя в целом.

## Проблема.

Существующие модели профильных потерь обладают низкой точностью, применение их для расчета узла турбины в рамках цифрового двойника приведет к некорректной увязке параметров двигателя, что приведет к необходимости множественного уточнения результатов и увеличения срока проектирования.

## Цель.

Повысить точность модели профильных потерь

## Задачи.

1. Оцифровка данных по потерям и геометрическим параметрам.
2. Воспроизведение модели Венедиктова. Оценка точности модели.
3. Построение модели нейронной сети по оцифрованным данным из атласа.
4. Обучение модели. Оценка точности модели.

Модель профильных потерь представленная в атласе экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин (Венедиктов, 1990) построена на уравнении регрессии представляющем собой сумму линейных функций произведений геометрических параметров. Данная модель построена на экспериментальных данных для плоских решётки турбин.

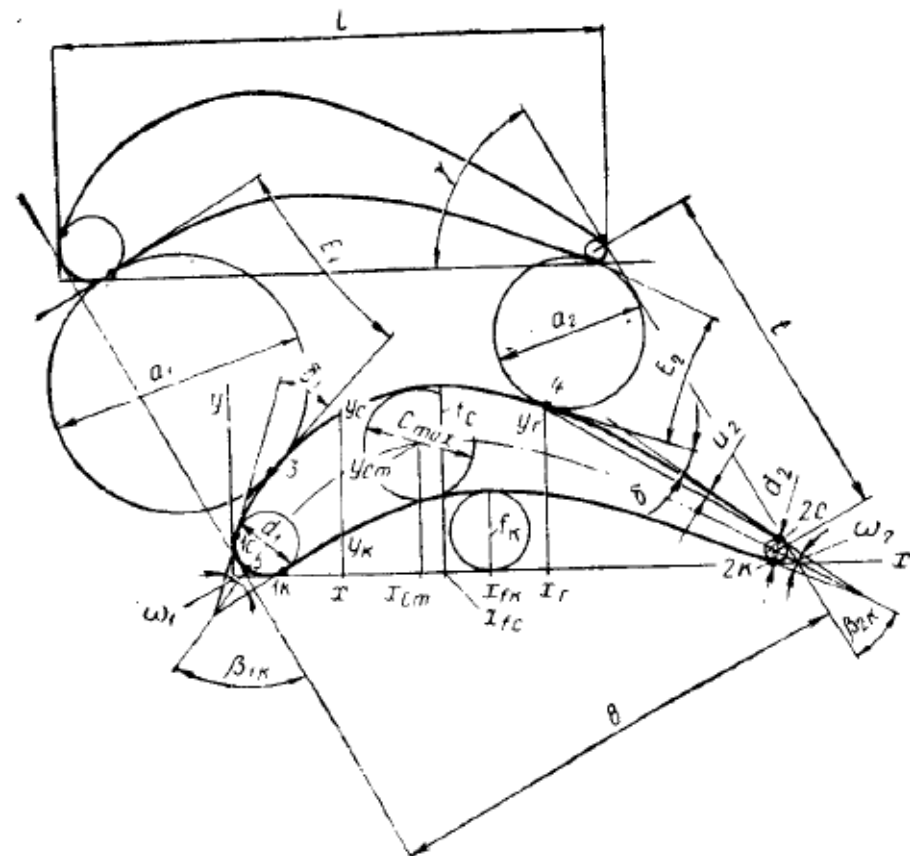


Рис. 1. Схема турбинной решетки

№	Параметр
1	beta1k
2	beta2eff
3	c_max
4	t
5	delta
6	d1
7	d2_otn
8	gamma
9	x_cm
10	y_cm
11	U_kp
12	E1
13	lamda2

Геометрические  
параметры  
модели

Газодинамический параметр

Модель потерь Венедиктова

$$\Delta y = \sum_{i=1}^m b_i z_i$$

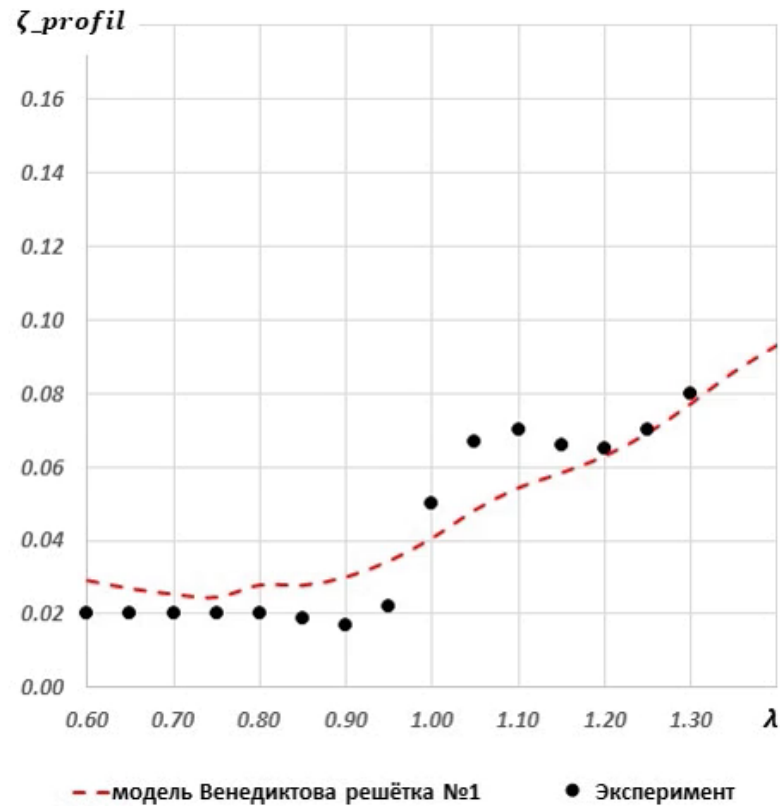
где

$z_i = z_i(x_1, \dots, x_k)$  — семейство аппроксимирующих функций, выбранных заранее;

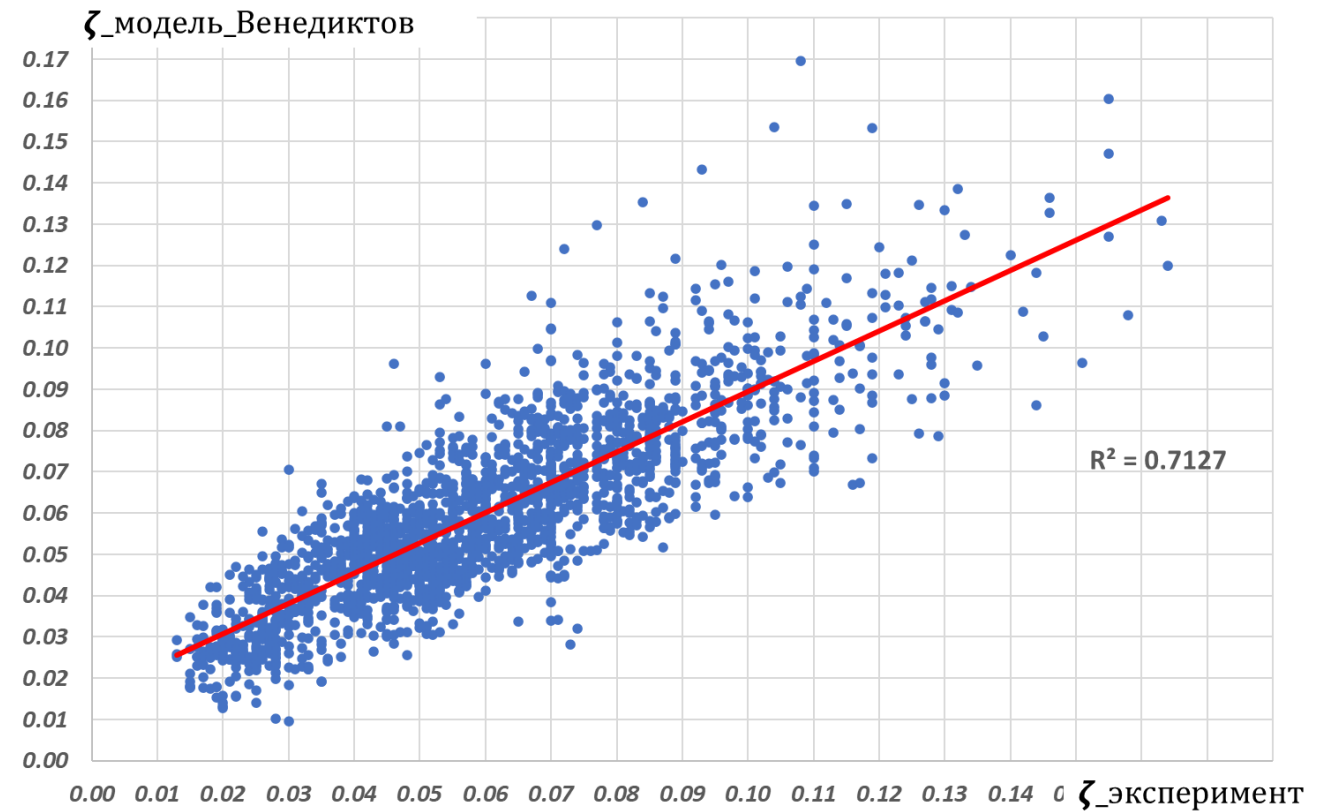
$b_i$  — неизвестные параметры (коэффициенты уравнения регрессии);

$m$  — число членов в уравнении регрессии.





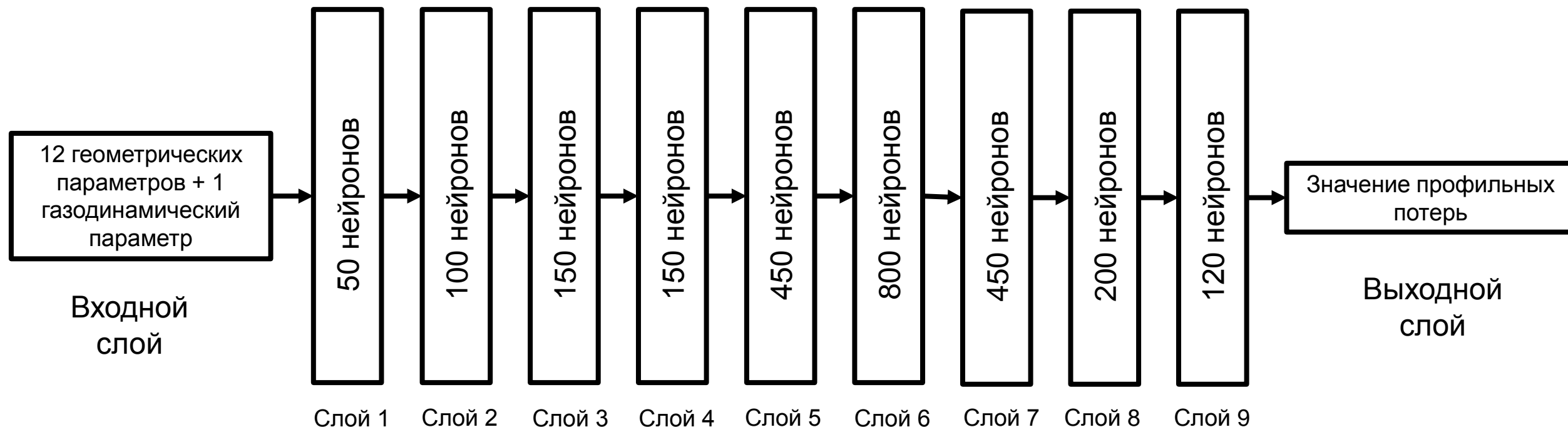
Это видео, можно воспроизвести



Сравнение экспериментальных данных (ось абсцисс) с данными полученными по модели Венедиктова (ось ординат)

Венедиктов указывает, что коэффициент множественной корреляции равен 0.86. Получено значение 0.84, что близко к указанному, что говорит о том, что модель воспроизведена корректно. Стандартная ошибка равна 0.014, в случае доверительного интервала 95% - 0.028. Значение средней абсолютной ошибки равно 0.011.

Модель потерь Волкова представляет из себя полносвязную нейронную сеть с 9 слоями.



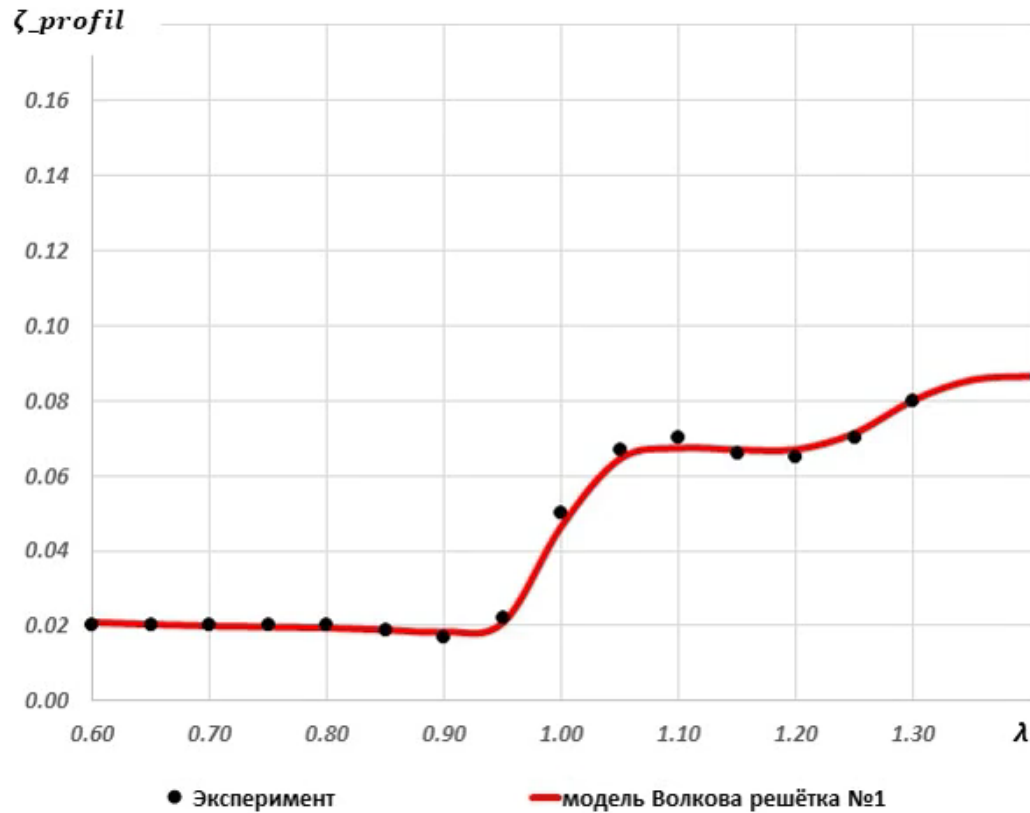
В качестве функции активации применена функция линейного выпрямления.

Для поиска весовых коэффициентов применен оптимизатор Nadam.

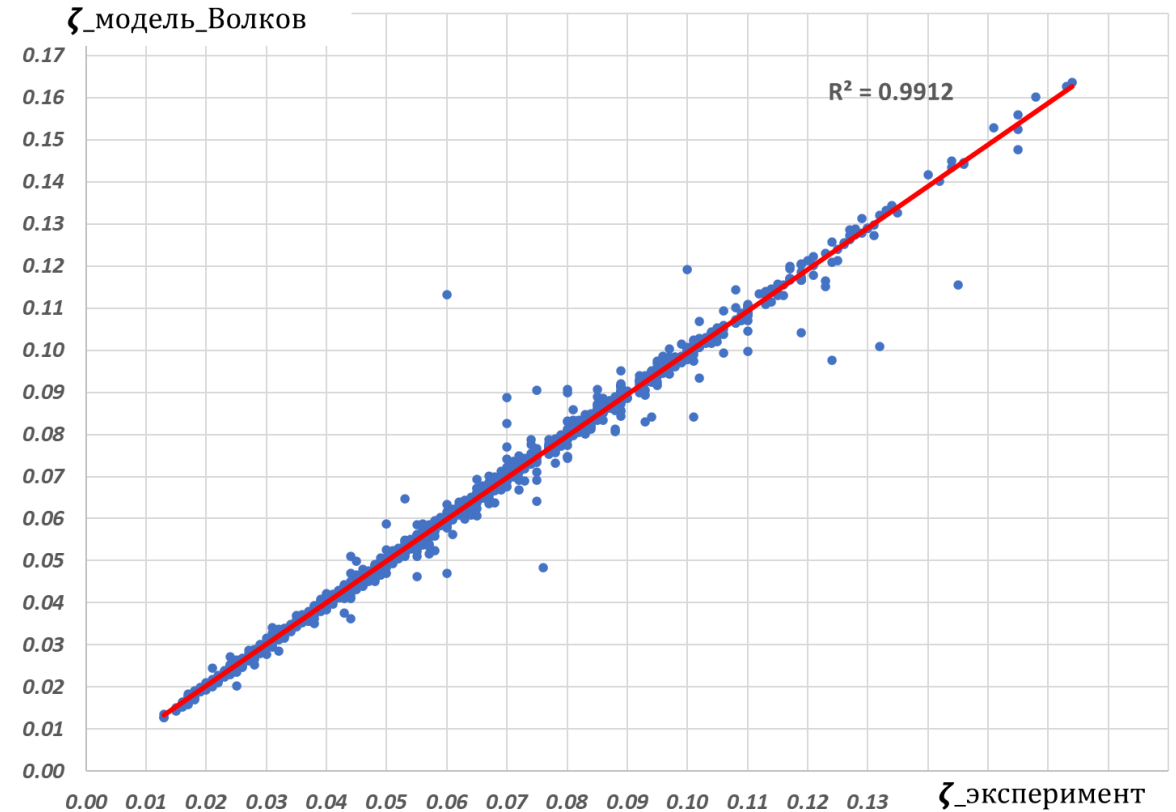
Обучение модели выполнялось с применением метода обратного распространения ошибки с помощью оценки среднеквадратичной ошибки между результатом полученным по модели и истинным (экспериментальным) значением.

При обучении также применялась кросс-валидация.

## 8 Оценка точности модели Волкова



Это видео, можно воспроизвести



Сравнение экспериментальных данных (ось абсцисс) с данными полученными по модели Волкова (ось ординат)

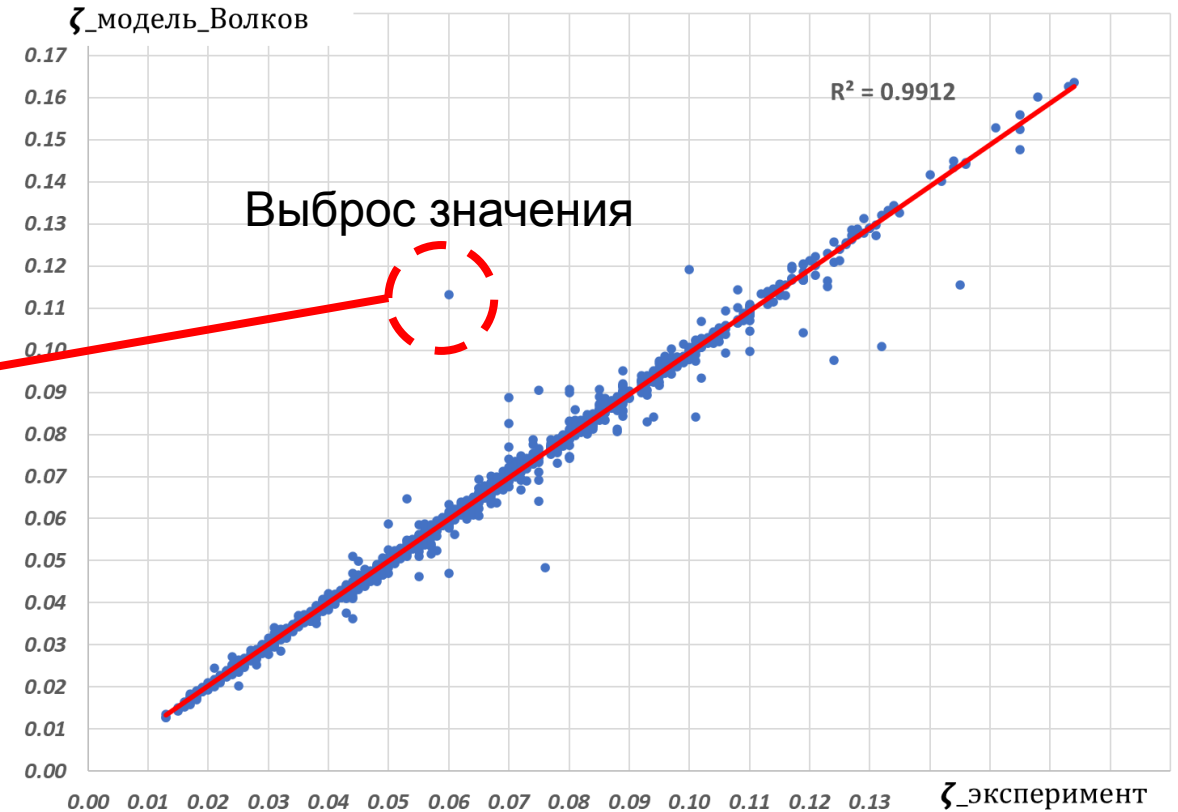
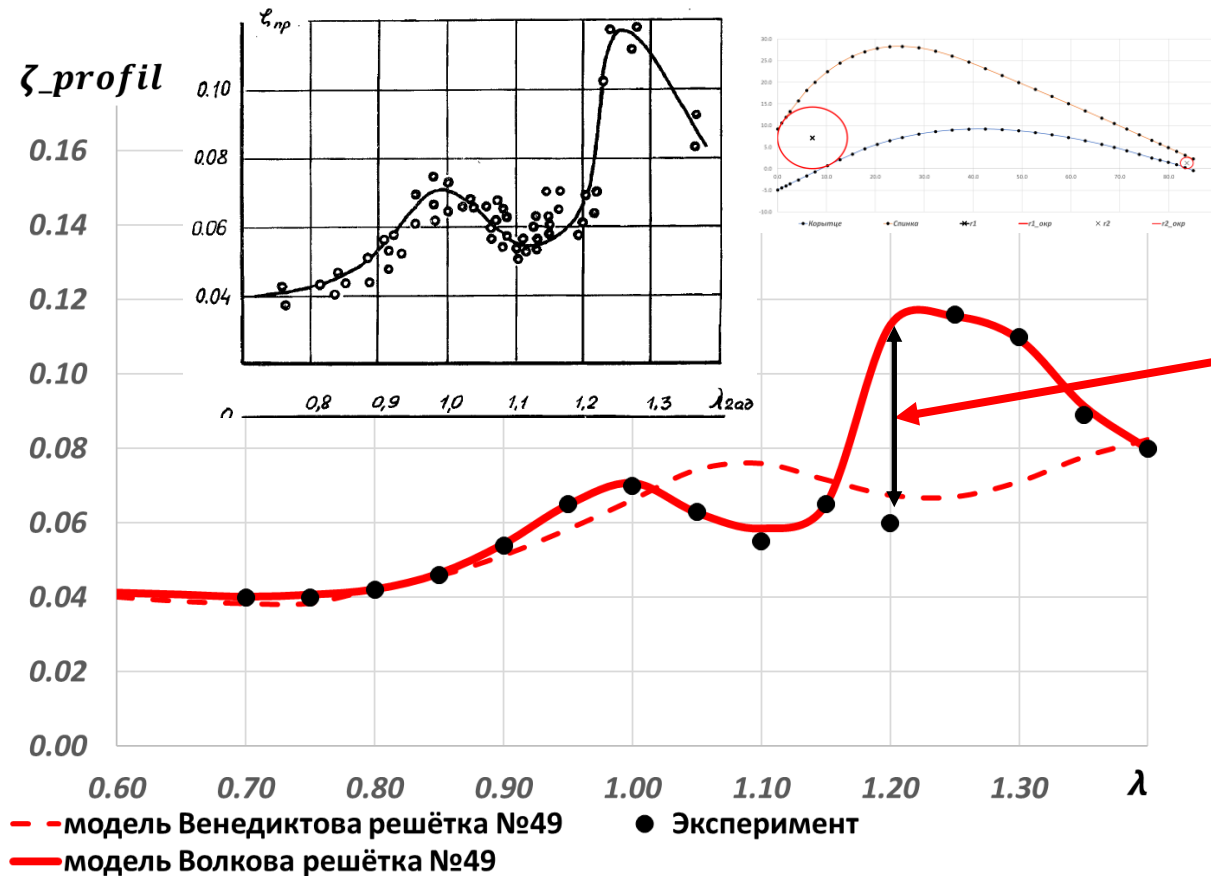
Получено значение коэффициента корреляции 0.9956.

Стандартная ошибка равна 0.002, в случае доверительного интервала 95% - 0.005.

Значение средней абсолютной ошибки равно 0.0002.

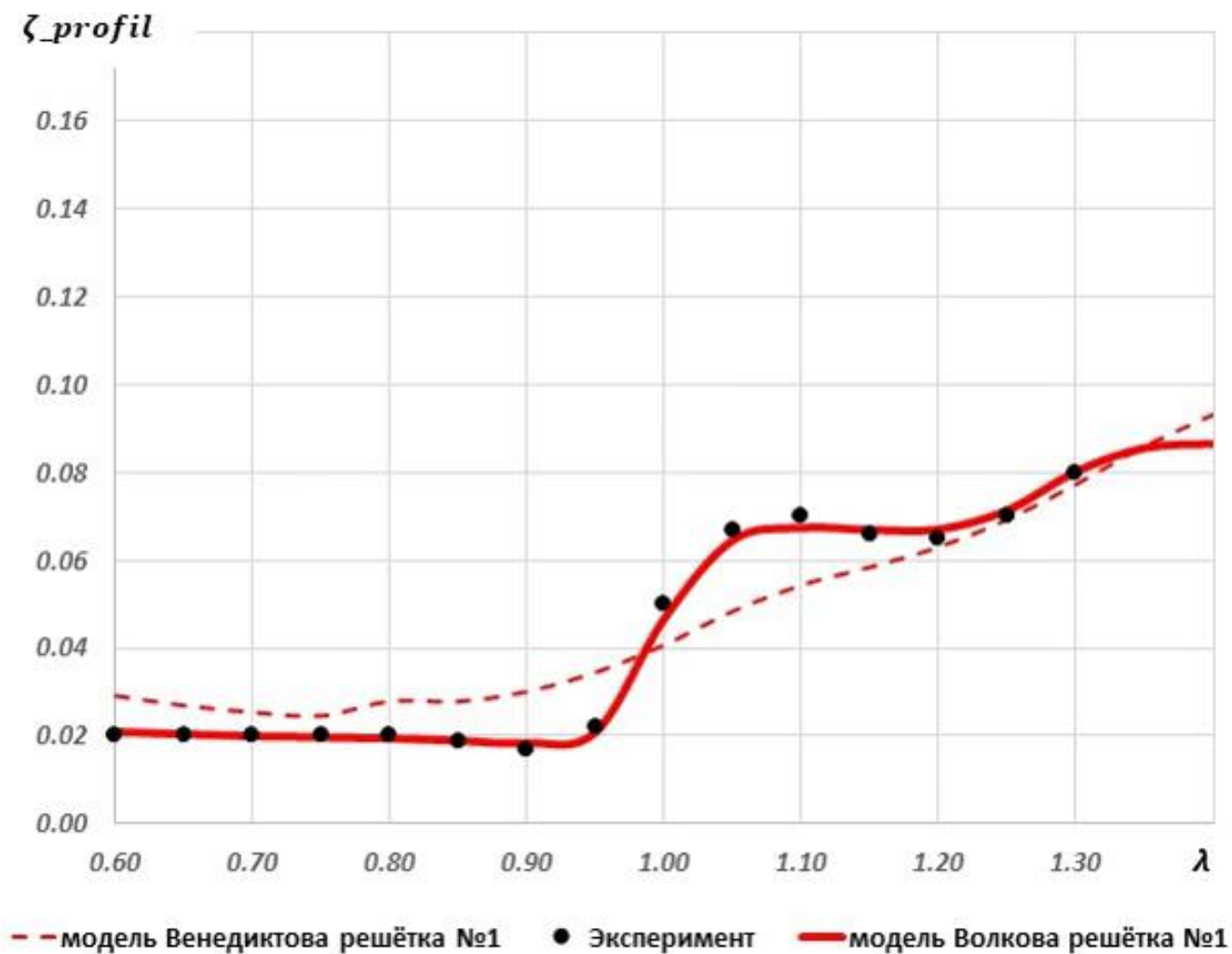


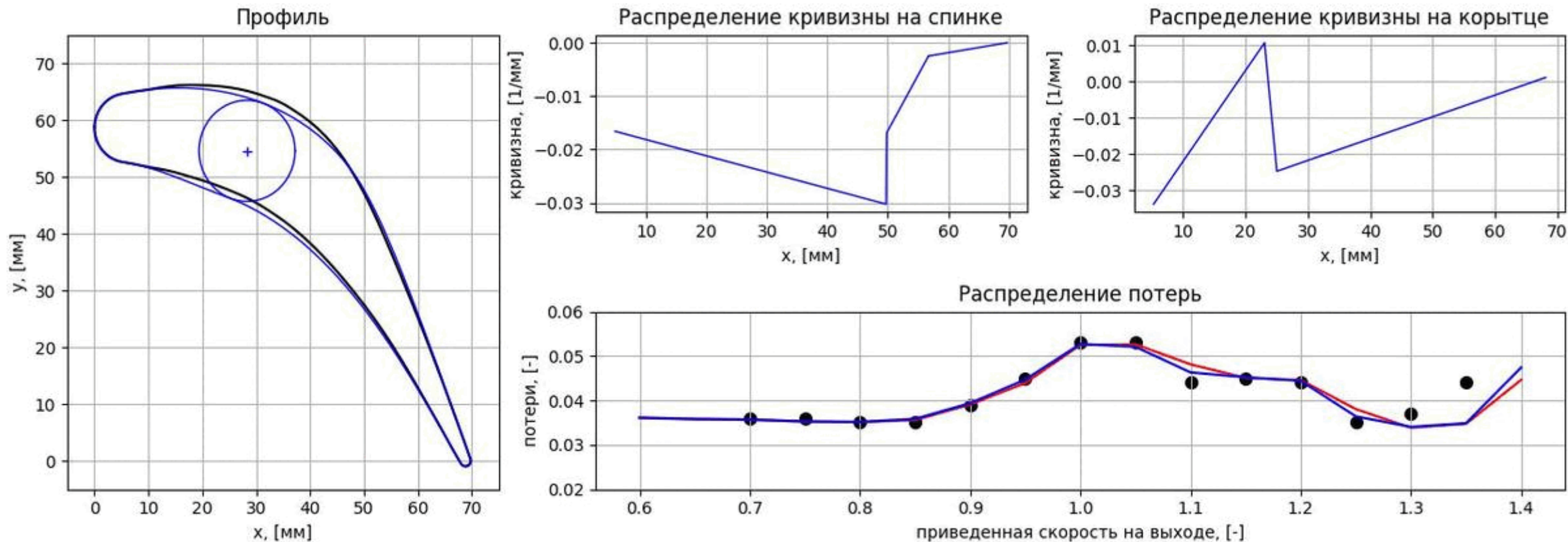
# 9 К вопросу о выбросах значений



Сравнение экспериментальных данных (ось абсцисс) с данными полученными по модели Волкова (ось ординат)

1. Все выбросы располагаются при приведенной скорости больше 1.1.
2. Уменьшение выбросов возможно изменением настроек модели при обучении (количество слоёв, нейронов, предварительная работа с данными).





Влияние изменения распределения кривизны на спинке на профильные потери.

Черные точки – экспериментальные значения потерь для 37 решётки

Красная линия потерь – это потери полученные по модели для геометрических параметров 37 решётки представленной в атласе

Синяя линия потерь – это потери рассчитываемые для каждого из рассматриваемых вариантов профилей

Из полученных результатов видно, что смещение точки перегиба кривизны (максимальной кривизны) ближе к входной кромке приводит к снижению потерь в диапазоне приведенной скорости от 0,6 до 1.

Изменение кривизны для модели потерь выражается в том, что изменяются параметры  $y_{ст}$  и  $E1$ , т.е. модель потерь косвенно учитывает изменение кривизны на данном участке.

1. Воспроизведена модель потерь Венедиктова. Коэффициент корреляции 0.84, стандартная ошибка 0.014.
2. Создана модель потерь с помощью нейронной сети. Коэффициент корреляции 0.99, стандартная ошибка 0.002.
3. Новая модель профильных потерь по величине стандартной ошибки в 7 раз точнее существующей модели.
4. Полученная модель может быть применена для расчета 1D модели турбины в рамках цифрового двойника ГТД.
5. Представлено дальнейшее направление работы по увеличению точности модели потерь, путем учета кривизны линий профиля.