

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТЕКАНИЯ ОДИНОЧНОЙ СТРУИ В ПОПЕРЕЧНЫЙ СНОСЯЩИЙ ПОТОК В ANSYS CFX

И. А. Кривошеев<sup>1</sup>, А. Е. Кишалов<sup>2</sup>, А. Д. Филимонова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>krivosh@sci.ugatu.ac.ru, <sup>2</sup>kishalov@ufanet.ru, <sup>3</sup>orangekitsune@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Приводятся результаты верификации термогазодинамического 3D численного моделирования втекания одиночной струи в поперечный сносящий поток в программном комплексе ANSYS CFX. Результаты моделирования сравниваются с результатами расчета по инженерной методике. Исследуется зависимость результатов моделирования от выбора параметров конечно-элементной сетки в том числе наличие тела влияния и применения адаптации. Оценивается влияние модели турбулентности на результаты моделирования. Выбирается оптимальный вариант сочетания настроек конечно-элементной сетки и модели турбулентности.

**Ключевые слова:** 3D моделирование; термогазодинамика; вдув поперечной струи; струйное течение; ANSYS CFX; верификация результатов моделирования.

### ВВЕДЕНИЕ

В качестве силовых установок современных маневренных самолетов используются двигатели, выполненные по схеме ТРДДсм. В целях возможности кратковременного увеличения тяги двигателя подобной схемы оснащаются форсажной камерой сгорания. Стабилизация горения топлива в форсажной камере обеспечивается наличием стабилизаторов пламени, которые создают зону обратных токов. Наиболее широкое распространение получили V-образные стабилизаторы, основным недостатком которых являются большие гидравлические потери полного давления на бесфорсажных режимах работы двигателя. Одним из перспективных направлений дальнейшего развития форсажных камер является применение аэродинамической стабилизации пламени, позволяющей сократить до минимума гидравлические потери на бесфорсажных режимах.

Современные методы исследования различных термогазодинамических процессов включают в себя 3D численное моделирова-

ние, что позволяет ускорить процесс разработки продукции посредством уменьшения объема экспериментальных исследований и доводки.

Целью данной работы является верификация результатов 3D численного термогазодинамического моделирования по известной инженерной методике расчета втекания поперечных струй в сносящий поток в программном комплексе ANSYS CFX.

### ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Известная инженерная методика расчета траектории втекания дозвуковых струй в сносящий поток, основанная на экспериментальных исследованиях, представлена в работе [1]. Согласно этой методике траектория втекания струи для условий течения, характерных для камер сгорания газотурбинных двигателей, определяется по формуле:

$$\frac{y}{d} = 0,82 \left( \frac{\rho W^2}{\rho_n W_n^2} \right)^{0,5} \left( \frac{x}{d} \right)^{0,33}.$$

Индексом «П» выделены параметры, относящиеся к основному потоку.

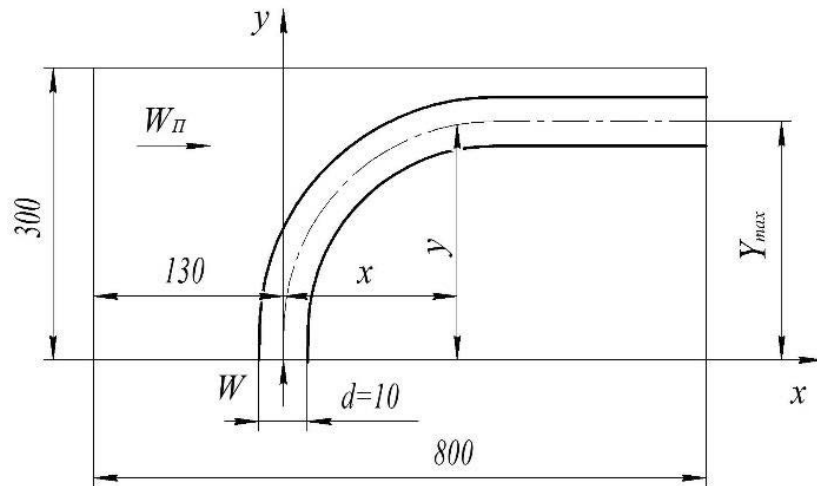


Рис. 1. Расчетная схема втекания струи в сносящий поток

Данная зависимость была получена в результате анализа большого числа экспериментальных данных по полям температур при проникновении холодной воздушной струи через отверстие в сносящий поток горячего газа (рис. 1) на различных расстояниях от места ввода струи [1]. По положению точек с наименьшей температурой в поперечном сечении определялась температурная ось струи, а за глубину проникновения  $Y_{max}$  принималось такое расстояние от стенки, на котором осевая линия струи приобретала направление сносящего потока.

Согласно [1, 2] глубина проникновения струи зависит от отношения скоростных напоров  $0,5\rho W^2$  поперечной струи и основного потока, а также диаметра входного отверстия.

В данном исследовании принято, что струя воздуха диаметром  $d = 10$  мм втекает в рабочую область со скоростью  $W = 50$  м/с. Скорость сносящего потока, движущегося в рабочей области,  $W_p = 10$  м/с. При этом температуры и статические давления струи и потока одинаковы и составляют  $T^* = 700$  К и  $p = 25$  атм. Ширина расчетной области была выбрана таким образом, чтобы исключить влияние границ на траекторию втекающей струи, и составила 250 мм.

По инженерной методике расчета была определена траектория втекания струи в сносящий поток. Результаты расчета представлены на рис. 2.

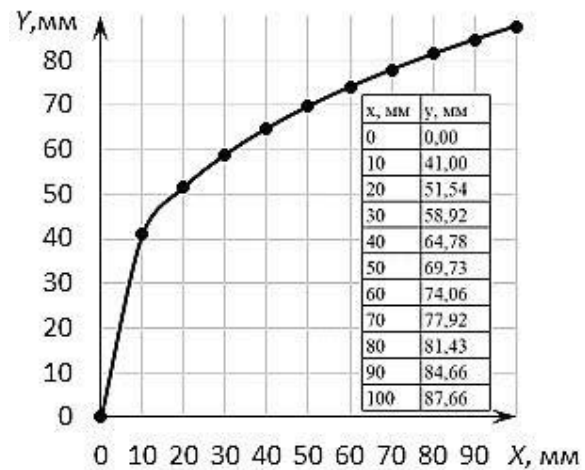


Рис. 2. Траектория втекания струи в сносящий поток

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Модель расчетной области (рис. 1) была построена в CAD-системе программного комплекса ANSYS – Design Modeler.

Для оценки влияния конечно-элементных сеток на результаты численного моделирования в программном комплексе ANSYS были построены несколько вариантов конечно-элементных сеток в компоненте ANSYS Mech (табл. 1). Также в рамках данного исследования оценивалось влияние модели турбулентности на результаты расчета. Всего было рассчитано 9 вариантов конечно-элементной сетки.

В вариантах 1–4 конечно-элементной сетки было применено тело влияния, позволяющее загустить сетку только в определенном месте рабочей области (рис. 3, б)

в целях экономии расчетных ресурсов. В вариантах 1 и 2 средний размер элемента сетки в месте расположения тела влияния 3,8 мм, в вариантах 3 и 4–6 мм.

На ряде сеток 4–9 была применена адаптация (рис. 3, в) по концентрации воздуха, втекающего в основной поток через отверстие, что позволило загустить сетку не во всей рабочей области, а только в месте течения струи. Адаптация проводилась путем

кратного увеличения количества узлов сетки в несколько этапов [3]. Количество этапов определялось числом шагов адаптации, а кратность увеличения числа узлов – узловым фактором или множителем. Также задавался параметр, характеризующий максимальное количество итераций за один шаг адаптации в случае, если достаточная сходимость не была достигнута за это время (табл. 1).

Таблица 1

Варианты конечно-элементных сеток и модели турбулентности

Вариант	Кол-во элементов сетки до/после адаптации	Тело влияния, средний размер элемента, мм	Замельчение в месте втекания струи, средний размер элемента, мм	Адаптация: число шагов / множитель / максимальное к-во итераций за шаг	Модель турбулентности	Средний размер элемента сетки, мм
1	3 149 539 / –	3,8	3	–	SST	11,5
2	3 149 539 / –	3,8	3	–	к-ε	11,5
3	1 153 000 / –	6	3	–	к-ε	11,5
4	309 800 / 3 002 751	6	3	4/10/50	SST	11,5
5	84 781 / 815 820	–	3	4/10/50	SST	11,5
6	84 781 / 1 219 374	–	3	5/15/60	SST	11,5
7	84 781 / 1 254 680	–	3	5/15/60	к-ε	11,5
8	8 005 074 / 15 321 794	–	–	3/2/50	SST	2,5
9	8 005 074 / 15 288 348	–	–	3/2/70	SST	2,5
10	8 005 074 / –	–	–	–	SST	2,5
11	42 834 811 / –	–	–	–	SST	1,5

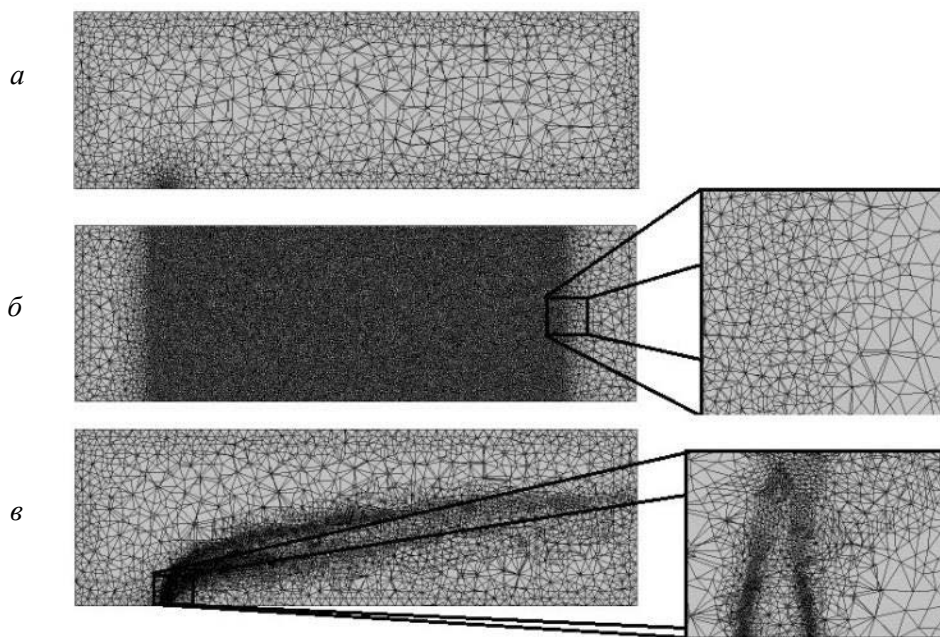


Рис. 3. Варианты конечно-элементной сетки:

а – замельчение в месте втекания струи; б – тело влияния; в – адаптация

Для возможности построения конечно-элементной модели с адаптацией по концентрации при моделировании процесса в ANSYS CFX в качестве рабочего тела использовалась смесь газов: воздуха, входящего в рабочую область (AirIdealGas1) и воздуха вдуваемой струи (AirIdealGas2).

В вариантах 4 и 5 была использована четырехступенчатая адаптация с кратностью увеличения количества узлов 10 и максимальным числом итераций 50. В вариантах 6 и 7 количество шагов адаптации было увеличено до 5, узловой фактор увеличен до 15, а максимальное число итераций – до 60. Ввиду малости размера элементов сетки до адаптации в вариантах 7 и 8 число шагов адаптации было снижено до 3 при двукратном увеличении количества узлов. В варианте 7 максимальное число итераций за один шаг составило 50, а в варианте 8–70.

На вариантах 2, 3, 7 конечно-элементной сетки была использована модель турбулентности  $k-\epsilon$ , которая показывает хорошую сходимости для свободных течений. На остальных вариантах конечно-элементной сетки применена более сложная модель турбулентности Ментера (SST), учитывающая перенос касательных напряжений [4].

В компоненте CFX-Pre программного комплекса ANSYS заданы граничные условия, соответствующие принятым в инженерной методике расчета.

На левой границе модели и в месте втекания струи были установлены граничные условия Inlet, на которых заданы скорости основного потока и струи, а также их температуры. В качестве рабочего тела использовалась смесь идеальных газов. Модель переноса тепла – Thermal Energy.

На правой границе модели установлено граничное условие Outlet со статическим избыточным давлением 0 Па, при заданном ссылочном давлении 25 атм. Граничное условие на стенках модели – Free Slip Wall.

В ходе исследования было проведено 11 расчетов. Расчет считался завершенным, когда сходимость достигала порядка 0,0001.

На рис. 4–5 представлены некоторые результаты расчета.

Для определения траектории струи в модели в ANSYS CFX-Post были построены 10 линий с интервалом в 10 мм по оси X (рис. 1) от начала координат в плоскости, проходящей через ось струи. Каждая линия разбивалась на 100 отрезков, на которых происходил замер концентрации рабочих тел. Дальнейшая обработка производилась при помощи Microsoft Excel. За ось струи на каждой линии было принято максимальное значение концентрации воздуха вдуваемой струи (AirIdealGas2).

В табл. 2 и 3 приведены результаты 3D численного моделирования в программном комплексе ANSYS CFX и их погрешности относительно инженерного метода расчета.



Рис. 4. Концентрация AirIdealGas2 в плоскости, проходящей через ось струи

Рис. 5. Распределение проекции скорости на ось  $u$  в плоскости, проходящей через ось струи

Таблица 2

## Результаты численного 3D-моделирования в ANSYS CFX

$x, \text{ мм}$	$y, \text{ мм}$										
	Вариант										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	31,31	30,30	27,78	37,88	40,71	41,41	41,41	40,40	40,40	36,36	40,40
20	45,45	45,45	37,88	50,50	52,52	53,54	53,53	51,51	51,51	47,47	53,53
30	54,54	53,03	45,45	58,08	60,40	60,61	61,62	59,59	59,59	57,58	62,63
40	59,60	60,61	45,45	45,45	65,66	65,66	68,69	64,65	65,66	63,64	69,70
50	64,65	65,66	53,03	50,50	70,91	69,70	74,75	54,54	52,52	68,69	74,75
60	70,71	70,71	58,81	53,03	73,53	72,73	79,80	58,56	56,56	74,75	79,80
70	73,74	73,23	65,66	55,55	74,85	73,74	84,85	62,63	60,61	78,79	80,81
80	64,65	65,67	70,71	58,08	76,16	76,77	87,89	65,66	63,64	70,71	83,33
90	70,71	70,71	75,76	63,13	76,16	79,80	91,92	67,68	65,76	77,78	88,89
100	74,75	70,71	75,76	63,13	76,16	81,82	89,90	70,71	68,52	83,84	91,11

Таблица 3

## Погрешности результатов численного 3D-моделирования в ANSYS CFX

$x, \text{ мм}$	$\delta y, \%$										
	Вариант										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	23,63	26,09	32,35	7,94	0,71	-1,01	-1,01	1,45	1,45	11,31	1,45
20	11,80	11,80	26,50	2,00	-1,92	-3,88	-3,88	0,04	0,04	7,88	-3,88
30	7,42	9,99	22,85	1,42	-2,52	-2,87	-4,58	1,15	1,15	2,27	-6,30
40	8,01	6,45	29,83	29,84	-1,35	-1,35	-6,02	0,21	1,35	1,77	-7,58
50	7,29	5,85	23,95	27,57	-1,68	0,05	-7,19	21,78	24,68	1,50	-7,19
60	4,52	4,52	20,59	28,39	0,71	1,80	-7,75	20,89	23,62	-0,93	-7,75
70	5,37	6,01	15,74	28,70	3,95	5,37	-8,89	19,63	22,22	-1,11	-3,70
80	20,61	19,37	13,17	28,68	6,47	5,73	-7,91	19,37	21,85	13,17	-2,33
90	16,48	16,48	10,52	25,43	10,04	5,74	-8,57	20,06	22,33	8,13	-4,99
100	14,73	19,34	13,57	27,98	13,11	6,66	-2,56	19,34	21,82	4,36	-3,94
Среднее значение	11,99	12,59	20,90	20,76	4,25	3,44	5,84	12,39	14,05	5,24	4,91

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Варианты конечно-элементной сетки 1 и 2, содержащие тело влияния, различаются только моделью турбулентности. Из резуль-

татов численного моделирования видно, что выбор модели турбулентности для данной конечно-элементной сетки не оказывает существенного влияния на результаты моделирования. Разность между средними

значениями погрешностей расчета этих вариантов составляет меньше 1 %. Варианты конечно-элементной сетки с адаптацией 6 и 7 также различаются только моделью турбулентности, но погрешность результатов численного моделирования в варианте 6 с моделью турбулентности SST немного меньше. Разность между средними значениями погрешностей для данных вариантов составляет 2,4 %.

Применение тела влияния на вариантах 1–4 не оказало положительного эффекта на точность расчетов при незначительной экономии расчетных ресурсов. Сравнивая варианты 4 и 5 конечно-элементной сетки, отличающиеся только наличием тела влияния, видно, что средняя погрешность результатов расчета при наличии тела влияния оказалась выше на 16,5 %. Варианты 3 и 7 конечно-элементной сетки имеют почти одинаковое количество элементов (1 153 000 и 1 255 000). В варианте 3 применено тело влияния, а в варианте 7 – пятиступенчатая адаптация с узловым фактором 15. Сравнивая результаты моделирования по данным вариантам видно, что при наличии тела влияния средняя погрешность расчетов оказалась выше на 15,1 %, чем при использовании адаптации. Большой точно-

сти моделирования, вероятно, можно достичь путем применения тел влияния в форме струи с более мелкой конечно-элементной сеткой.

Варианты 5 и 6 конечно-элементной сетки отличаются количеством шагов адаптации и узловым фактором. Из результатов численного моделирования видно, что средняя погрешность варианта 6 с большим числом шагов адаптации и большим множителем (а, соответственно, и меньшим размером элемента сетки) меньше на 0,8 %.

Варианты 8 и 9 конечно-элементной сетки отличаются только максимальным количеством итераций за один шаг адаптации. Из результатов расчета видно, что точность определения траектории практически не зависит от максимального числа итераций за шаг адаптации. Средняя погрешность обоих вариантов конечно-элементной сетки очень большая и составляет 12,4 % для варианта 8 и 14,0 % для варианта 9.

Применение адаптации на вариантах 8 и 9 конечно-элементной сетки не целесообразно в плане точности расчетов и экономии расчетных ресурсов. Вариант 10 конечно-элементной сетки в отличие от вариантов 8 и 9 не содержит адаптации, но средняя погрешность расчета меньше и составляет 5,24 %.

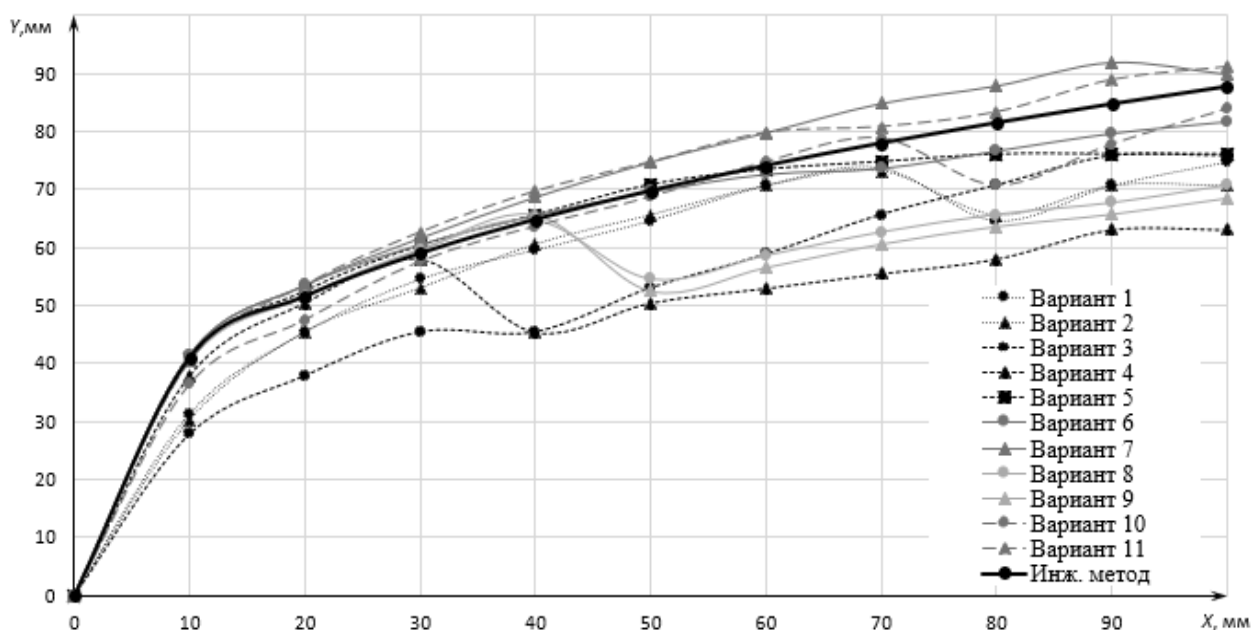


Рис. 6. Результаты расчетов втекания струи в сносящий поток

Вариант 11 конечно-элементной сетки отличается от варианта 10 только количеством, а, соответственно, и размером элементов сетки. Разность средней погрешности расчета данных вариантов незначительна и составляет 0,3 %, при этом экономия расчетных ресурсов у конечно-элементной сетки по варианту 10 выше.

Во всех вариантах конечно-элементной сетки наблюдается резкий скачок траектории струи (рис. 6). Это связано с тем, что основной поток, обтекая поперечную струю, захватывает ее и деформирует, разбивая на два парных вихря по бокам струи (рис. 7). Так как траектория струи определялась по максимальной концентрации воздуха в плоскости, проходящей через ось струи, то образование двух парных вихрей могло вызвать дополнительные погрешности при нахождении траектории.

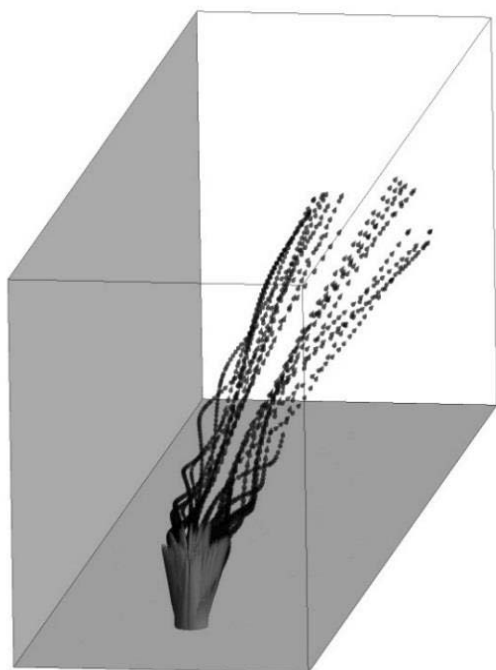


Рис. 7. Траектория поперечной струи

Конечно-элементная сетка по варианту 3 с моделью турбулентности  $k-\epsilon$  дает большие значения погрешностей результатов расчета по всей длине замера.

Наименьшую погрешность результатов расчета относительно инженерной методике дает вариант 6 конечно-элементной сетки с адаптацией и моделью турбулентности SST (3,5 %).

Различие результатов расчета по инженерной методике и в программном комплексе ANSYS CFX также может быть объяснено несовершенством инженерной методике, составленной на основе аппроксимации экспериментальных данных.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы произведено термогазодинамическое 3D численное моделирование втекания одиночной струи в сносящий поперечный поток в ANSYS CFX.

Проведено 11 расчетов, результаты которых были сравнены с расчетом по инженерной методике. Исследована зависимость точности результатов моделирования от параметров конечно-элементной сетки и выбора модели турбулентности.

В ходе изучения влияния настроек конечно-элементных сеток установлено, что применение тела влияния не оказало положительного эффекта на результаты моделирования в рамках данного исследования.

Выявить влияние модели турбулентности на результаты расчета в ходе данной работы не удалось. Средняя погрешность результатов для вариантов конечно-элементных сеток, отличающих только моделями турбулентности, различается незначительно (на 1–2 %).

Наименьшую погрешность расчетов дает вариант 6 конечно-элементной сетки с пятикратной адаптацией, узловым фактором 15, рассчитанной по модели турбулентности Ментера (SST). Средняя погрешность результатов расчета по этому варианту составила 3,5 %.

Вариант 11 конечно-элементной сетки с большим количеством элементов (42 834 811), рассчитанный по модели турбулентности Ментера (SST), также дает небольшую погрешность расчетов (средняя погрешность составила 4,9 %). Однако по сравнению с вариантом 6 является менее целесообразным в плане экономии расчетных ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД М.: Мир, 1986. 566 с. [A. Lefebvre, *Gas turbine combustion*, (in Russian). Moscow: Mir, 1986.]

2. **Иванов Ю. В.** Газогорелочные устройства М.: Недра, 1972. 276с. [U.V. Ivanov, Gas-fired equipment, (in Russian). Moscow: Nedra, 1972.]

3. **ANSYS Help** [Электронный ресурс]. URL: <https://ansyshelp.ansys.com> (дата обращения 01.03.2018). [ANSYS Help [Online]. Available: <https://ansyshelp.ansys.com>]

4. **Кудоярова В. М., Кишалов А. Е.** Решение прикладных задач теплообмена и гидрогазодинамики в пакете ANSYS: учебное пособие Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 219с. [V.M. Kudoyarova and A.E. Kishalov, Solution of the applied problems of heat transfer and fluid and gas dynamics in the ANSYS pack, manual, (in Russian). Ufa: RIK UGATU, 2016.]

#### ОБ АВТОРАХ

**КРИВОШЕЕВ Игорь Александрович**, проф., науч. рук. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (СГАУ, 2000). Иссл. в обл. моделир. раб. процессов лопаточных машин.

**КИШАЛОВ Александр Евгеньевич**, доц. каф. авиационной теплотехники и теплоэнергетики УГАТУ, дипл. инж. (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2010). Исследования в области имитационного моделирования автоматики авиационных ГТД, на установившихся и неустановившихся режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

**ФИЛИМОНОВА Арина Дмитриевна**, студент 4 курса направления «Двигатели летательных аппаратов» кафедры авиационных двигателей УГАТУ.

#### METADATA

**Title:** Verification of results of thermogasdynamic 3D-simulation single jet's penetration into a cross-flow using ANSYS CFX.

**Authors:** I. A. Krivosheev<sup>1</sup>, A. E. Kishalov<sup>2</sup>, A. D. Filimonova<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> krivoshe@sci.ugatu.ac.ru, <sup>2</sup> kishalov@ufanet.ru,

<sup>3</sup> orangekitsune@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (20), pp. 101-108, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** The results of verification of thermogasdynamic 3D-simulation single jet's penetration into a cross-flow using ANSYS CFX are reported in this scientific article. Results of the simulation are equated with the calculation of the engineering technique. The influence of the results of the simulation to selection of the grid settings including the existence of the body of influence and use of the adaptation is measured. The influence of the selecting a model of turbulence to results of simulation is investigated. The best options of combination of the grid settings and the model of turbulence is selected.

**Key words:** 3D-simulation; thermogasdynamics; single jet's penetration; stream flow; ANSYS CFX; verification of results of simulation.

**Krivosheev, Igor Alexandrovich**, Prof., Aviation Engines Dept. Dipl. Mech. Eng. (USATU, 1976). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 1981), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2000).

**KISHALOV, Alexander Evgenievich**, Associate professor of aviation heat power engineering department of USATU. Graduate engineer (USATU, 2006). Cand. Tech. Sci. of thermal, electrical rocket engines and power plants of aircraft (USATU, 2010). Research in the field of simulation of stabilized and transient rating of gas-turbine engine, mathematical model of complex technical objects planning, automated design engineering system of GTE.

**FILIMONOVA, Arina Dmitrievna**, 4 th year student pursuing a bachelor's degree in aircraft engines of the Department of Aircraft Engines (USATU).