

УДК 621.4, 536.71
Код ГРНТИ 55.42.47.61.42.32,55.42.45.61.43.32

doi 10.54708/19926502_2025_29310996

О влиянии впрыска жидкости в проточную часть осевых компрессоров ГТД на процесс «влажного сжатия»

Ма Цзяжуй, Ф.Г. Бакиров*, И.М. Горюнов

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация. Рассматривается влияние впрыска жидкости в проточную часть осевого лопаточного компрессора ГТД или ГТУ на параметры компрессора на основе численного моделирования по программе *CompressorWI-2S*. Результаты расчетов представлены в виде таблиц и в графической форме.

Ключевые слова: осевой компрессор ГТД; впрыск жидкости; параметры и характеристика компрессора; программа для расчета параметров; результаты расчетов; таблицы и графики; анализ результатов.

*fgbakirov@bk.ru

Введение

В данной статье в развитие исследований процесса «влажного сжатия» в осевых компрессорах ГТД и ГТУ, результаты которых представлены в работах [1, 2, 3], рассматриваются и анализируются результаты расчетов этого процесса на основе разработанной авторами [4] специализированной программы *CompressorWI-2S*, выполненные применительно к ГТД АЛ-21Ф-3 и АЛ-31СТ. Как показано в работе [2], дополнительные возможности для моделирования параметров ГТД в целом, с учетом попадания или впрыска воды в проточную часть компрессора, возникают при использовании указанной программы *CompressorWI-2S* в сочетании с программами для термогазодинамического моделирования энергоустановок, в данной работе с системой имитационного моделирования *DVIGwT* [5, 6]. Результаты таких комбинированных расчетов, в частности характеристики осевого компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 при «влажном сжатии», представлены в данной статье в сравнении с опубликованными ранее экспериментальными данными других авторов [7]. Также анализируются результаты расчетов по программе *CompressorWI-2S* по влиянию впрыска воды в проточную часть компрессора на поступенчатое изменение углов набегания потока рабочего тела на лопатки компрессора. На примере расчета ступени осевого компрессора ГТД АЛ-31СТ при «влажном сжатии» выполнено сравнение результатов расчета по программе *CompressorWI-2S* с соответствующими данными расчета по универсальной программной системе *Ansys CFX*. Представлены также оценочные данные по влиянию впрыска некоторых других жидкостей, помимо воды, в проточную часть осевого компрессора ГТД.

Влияние впрыска воды в проточную часть компрессора на его характеристики

Выбор в качестве объекта исследования при численном моделировании именно осевого 14-ти ступенчатого компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 объясняется наличием для него значительного объема опубликованных в научной литературе экспериментальных и расчетных данных, а также параметров, характеризующих геометрию проточной части компрессора. Расчет характеристик данного лопаточного компрессора был произведен комбинированно с последовательным применением программы *CompressorWI-2S* и СИМ *DVIGwT* – как с впрыском воды в его проточную часть, так и при «сухом сжатии».

В качестве исходных данных при базовых расчетах принимались температура воздуха на входе $T_0 = 288,15$ К; давление $P_0 = 101325$ Па (760 мм. рт. ст.); относительная влажность воздуха $\varphi = 30\%$; расход воздуха $G_b = 86,0$ кг/с; частота вращения ротора турбокомпрессора

$n = 7300$ 1/мин; для впрыскиваемой жидкости – $T_{ж0} = 288,15$ К; средний медианный диаметр капель жидкости $d_k = 40$ мкм.

Распределение расхода впрыскиваемой жидкости по относительной высоте лопаток компрессора показано на рис. 1, и оно соответствует равной плотности расхода воды в воздухе в поперечном сечении компрессора с учетом возрастания площадей по радиусу при равномерном по высоте лопатки выборе контрольных сечений.

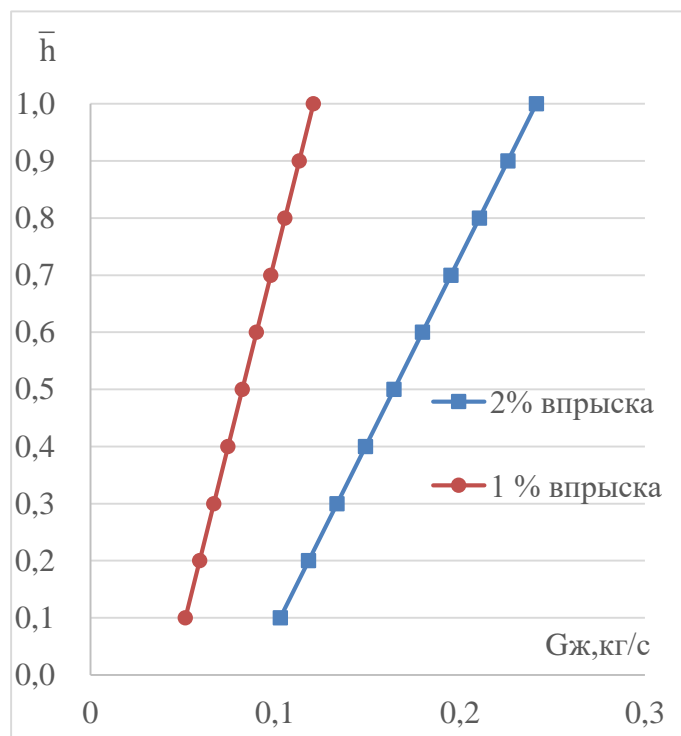


Рисунок 1. Распределение расхода воды по относительной высоте лопатки в ступени компрессора при впрыске жидкости.

На рисунках 2, 3 и 4 показаны рассчитанные по такой комплексной методике типовые характеристики осевого компрессора ГТД АЛ-21Ф-3, устанавливающие взаимосвязи между основными его параметрами при различных режимах работы, для расхода впрыска воды в количестве 2% от расхода воздуха при ее впрыске на входе компрессора. Выбран этот относительный расход впрыска жидкости, так как еще в работе [7] было показано, что в рассматриваемом осевом компрессоре обеспечивается полное испарение в его проточной части до 2,5 % расхода воды. Одновременно значимый по величине относительный расход впрыска $G_{ж}$ более показателен для выраженного проявления эффектов «влажного сжатия». Также для сравнения на рисунках приведены данные для «сухого» сжатия.

Как видно по характеристикам компрессора ГТД АЛ-21Ф-3, впрыск воды в проточную часть приводит к увеличению степени повышения давления в компрессоре π_k^* и его эффективного КПД $\eta_{эф}^*$, увеличению коэффициента запаса устойчивой работы компрессора ΔK_y , что отмечалось при расчете параметров «влажного сжатия» в компрессоре по программе *CompressorWI-2S* в работах [1–3], а также в ряде научных публикаций по этой тематике, например в [7–10]. В этих и других публикациях многих авторов отмечается, что впрыск воды в проточную часть осевых компрессоров ведет также к существенному снижению температуры T_k^* за компрессором за счет испарения жидкости, снижению удельных затрат работы сжатия (при оптимальных условиях организации впрыска).

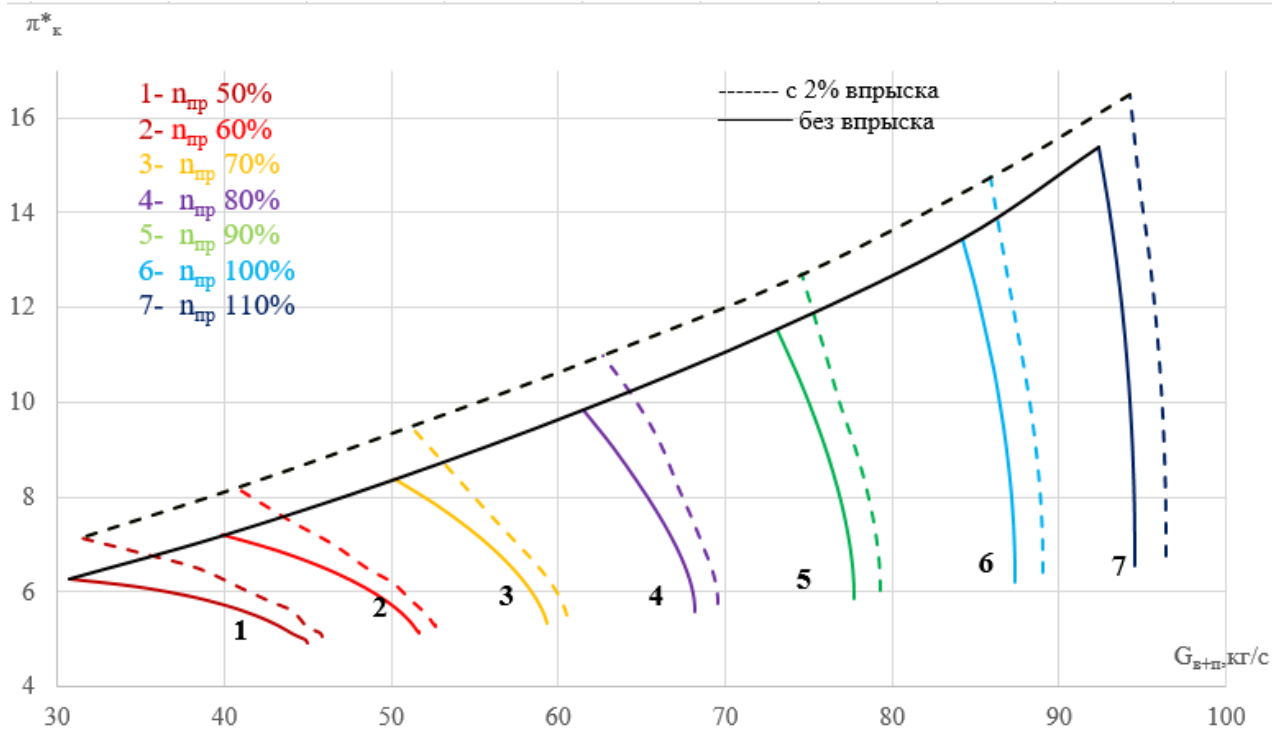


Рисунок 2. Влияние впрыска воды в проточную часть компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 на его характеристику по степени повышения давления.

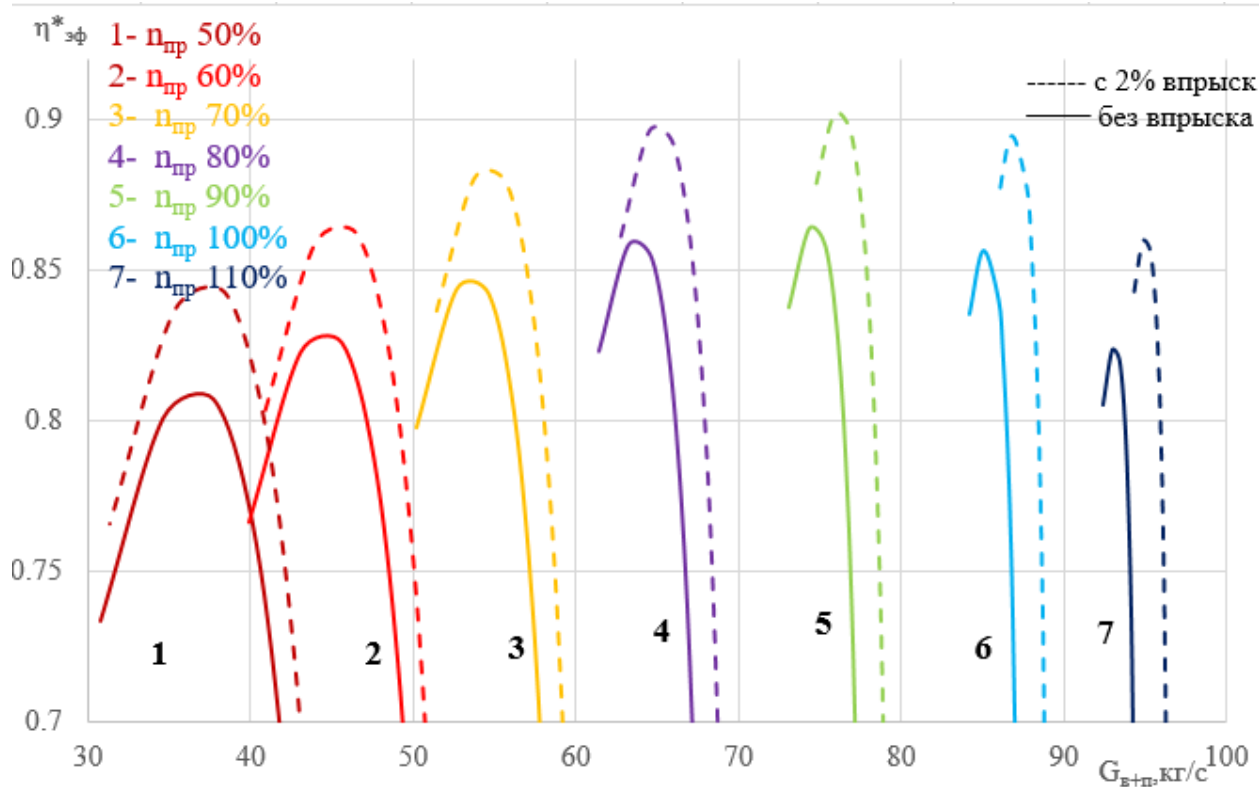


Рисунок 3. Влияние впрыска воды в проточную часть компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 на его характеристику по значениям эффективного КПД.

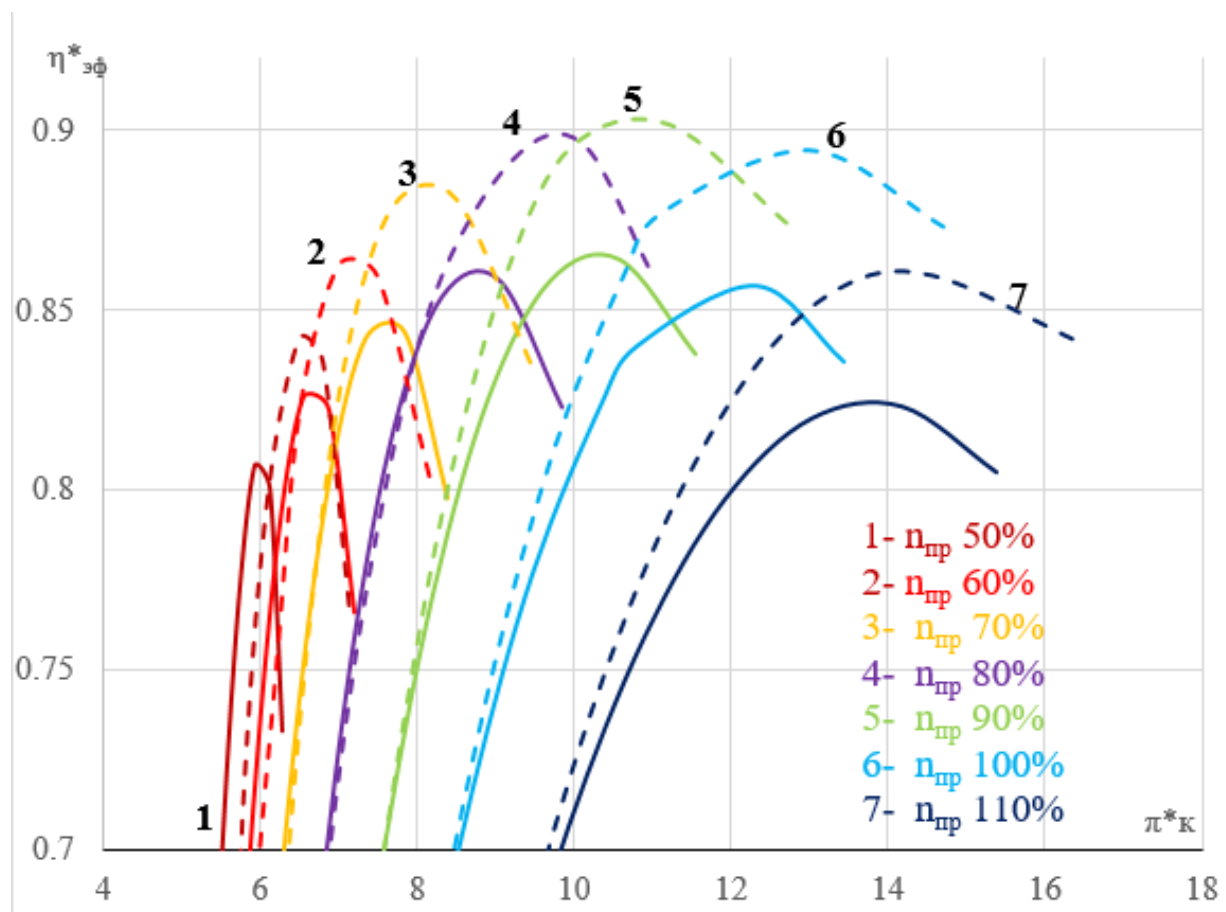


Рисунок 4. Влияние впрыска воды в проточную часть компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 на его характеристику по значениям эффективного КПД в зависимости от степени повышения давления.

Важным моментом для оценки корректности расчета характеристик компрессора при «сухом» и «влажном» сжатии по указанной методике является их сравнение с расчетными данными других авторов, использующих иные подходы к моделированию процессов, но еще в большей степени с экспериментальными данными. Так для характеристик осевого компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 в работах [7, 8] представлены результаты его стендовых испытаний на специально созданной установке МЭС-60. Для возможности сравнения с данными этих исследований компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 были выполнены расчеты его характеристик также для идентичных условий по режимам работы ГТД и условиям впрыска жидкости в его проточную часть, в частности с расходом 1,5%. Они представлены на Рис. 5 и 6. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что для всех значений $n_{пр}$ более 0,8 отмечается их высокая степень совпадения как для «влажного», так и «сухого», что относится как характеристике для степени повышения давления в компрессоре $\pi_{к}^*$, так по эффективному КПД $\eta_{эф}^*$. Значимые различия отмечаются только на низких $n_{пр}$, в основном для «влажного» сжатия. Однако на режимах малой нагруженности, во-первых, сам впрыск воды в проточную часть компрессора не целесообразен, во-вторых, измерения параметров могут производиться с меньшей точностью.

Таким образом, предложенная в данной работе комбинированная методика расчета характеристик осевого компрессора ГТД на основе совмещения двух моделирующих программ обладает для основных рабочих режимов его работы достаточно высокой точностью, позволяющей оценить влияние попадания или впрыска воды в проточную часть компрессора, что делает ее применимой на этапе прогнозирования характеристики компрессора при «влажном» сжатии еще на этапе проектирования.

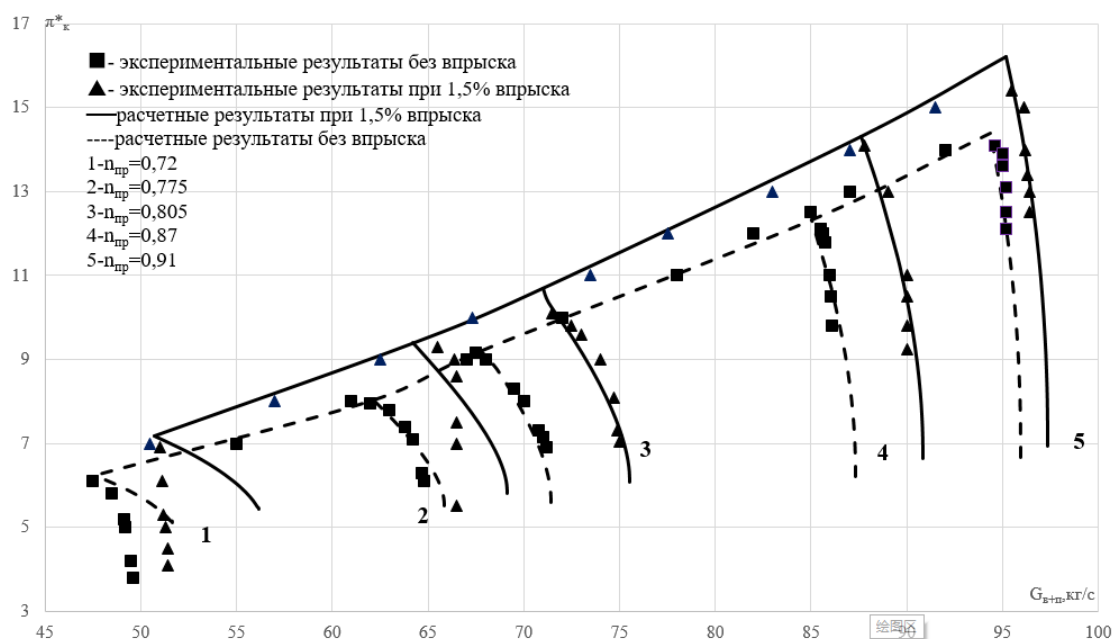


Рисунок 5. Сравнение характеристик компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 по степени повышения давления при впрыске и без впрыска воды в проточную часть, полученных расчетным путем по методике настоящей работы и по результатам стендовых испытаний авторами работ [7, 8].

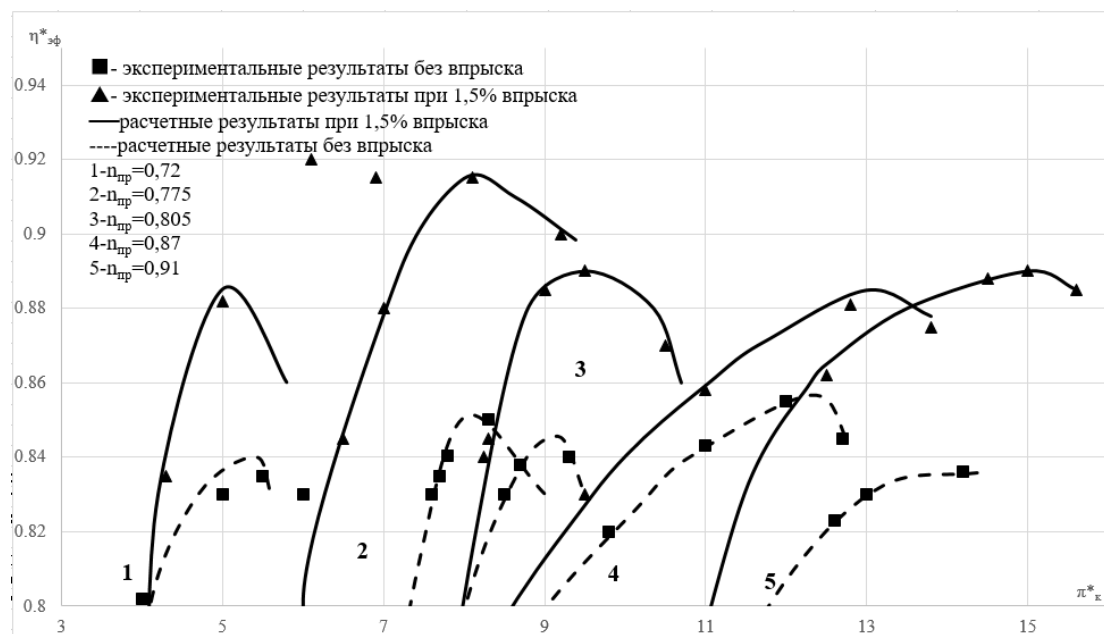


Рисунок 6. Сравнение характеристик компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 по эффективному КПД при впрыске и без впрыска воды в проточную часть, полученных расчетным путем по методике настоящей работы и по результатам стендовых испытаний авторами работ [7, 8].

Влияние впрыска воды в проточную часть компрессора на изменение углов обтекания потоком профилей лопаток ступени компрессора

Как известно, важнейшим фактором с точки зрения исключения срыва потока в ступенях при обтекании лопаток и неустойчивой работы компрессора является поддержание оптимальных расчетных углов их профилей в характерных сечениях ступеней. Это требование сохраняется и при впрыске воды в проточную часть компрессора, когда возрастает расход рабочего тела (воздух + пар), причем с его увеличением последовательно по ступеням по ме-

ре испарения жидкости вплоть до полного ее испарения. Соответственно на одних и тех же оборотах при впрыске воды изменится осевая составляющая осевой скорости потока C_{1a} по сравнению с «сухим» сжатием и скорректируются треугольники скоростей. Расчетные оценки по программе *CompressorWI-2S* были выполнены для режима работы компрессора с расходом воздуха $G_b = 86,0$ кг/с, частота вращения ротора турбокомпрессора 7300 об/мин ($n_{пр} = 100\%$), для 1, 7 и 14 ступеней компрессора в вариантах «сухого» и «влажного» сжатия при впрыске 2% расхода воды перед входным направляющим аппаратом. На Рис. 7 результаты расчетов приведены для средних по высоте лопаток сечений в ступенях. Они показали на незначительные изменения характерных углов в треугольниках скоростей при впрыске жидкости, которые представлены также в Табл. 1 (индексы при углах: 2 для сечения на выходе из РК ступени, 3 – на выходе из НА), что свидетельствует об отсутствии необходимости применять при впрыске жидкости дополнительный поворот лопаток направляющих аппаратов. Чуть более значимые отклонения характерны для последних ступеней, которые для осевого компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 и так конструктивно выполнены как поворотные. Аналогичные результаты получены при расчетах и для $n_{пр} = 80\%$.

Таблица 1. Влияние впрыска жидкости в проточную часть компрессора на характерные углы в ступенях.

$n_{пр} = 100\%$				$n_{пр} = 80\%$			
Номер ступени (без впрыска)	1	7	14	Номер ступени (без впрыска)	1	7	14
$G_{п+в}$, кг/с	86	86	86	$G_{п+в}$, кг/с	68,8	68,8	68,8
C_{1a} , м/с	200	190	120	C_{1a} , м/с	160	152	96
α_2 [гр]	53,23	44,16	35,14	α_2 [гр]	49,76	39,24	32,41
α_3 [гр]	68,46	71,31	48,89	α_3 [гр]	73,53	81,82	54,30
$\alpha_{на}$ [гр]	60,84	57,73	42,01	$\alpha_{на}$ [гр]	61,65	60,53	43,36
β_2 [гр]	69,29	71,57	48,89	β_2 [гр]	74,42	82,10	54,30
Номер ступени (2% впрыска)	1	7	14	Номер ступени (2% впрыска)	1	7	14
$G_{п+в}$, кг/с	86,07	86,53	87,72	$G_{п+в}$, кг/с	68,89	69,39	70,176
C_{1a} , м/с	200,16	191,17	122,50	C_{1a} , м/с	160,01	153,10	97,92
α_2 [гр]	53,25	44,33	35,69	α_2 [гр]	49,76	39,45	32,93
α_3 [гр]	68,47	71,42	49,47	α_3 [гр]	73,53	81,88	54,84
$\alpha_{на}$ [гр]	60,86	57,87	42,58	$\alpha_{на}$ [гр]	61,65	60,66	43,88
β_2 [гр]	69,31	71,67	49,47	β_2 [гр]	74,42	82,16	54,84
$\Delta\alpha_2$ [гр]	0,02	0,17	0,55	$\Delta\alpha_2$ [гр]	0,00	0,21	0,51
$\Delta\alpha_3$ [гр]	0,01	0,11	0,58	$\Delta\alpha_3$ [гр]	0,00	0,06	0,54
$\Delta\alpha_{на}$ [гр]	0,02	0,15	0,57	$\Delta\alpha_{на}$ [гр]	0,00	0,13	0,52
$\Delta\beta_2$ [гр]	0,02	0,1	0,58	$\Delta\beta_2$ [гр]	0,00	0,06	0,54

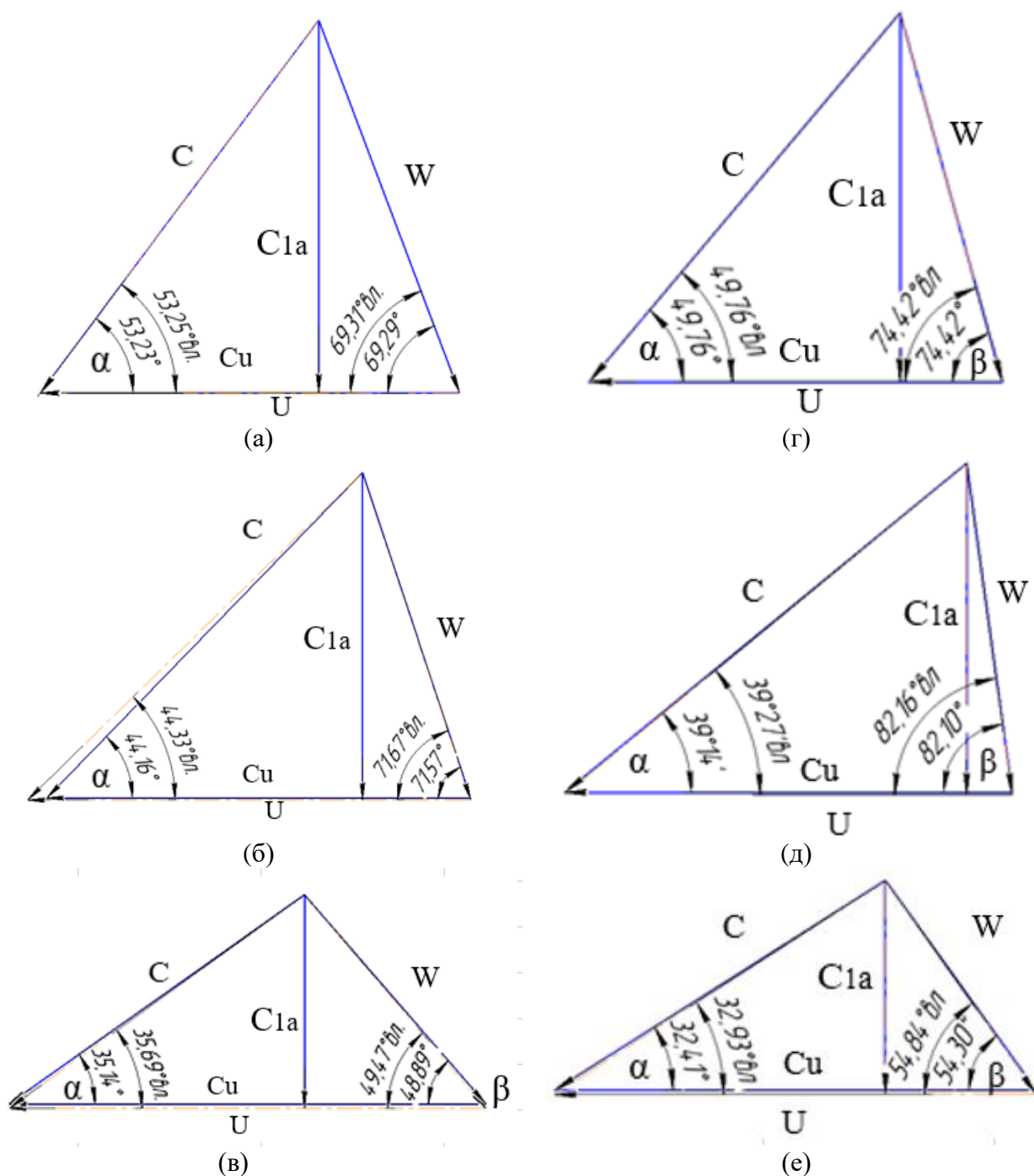


Рисунок 7. Сравнение треугольников скоростей по 3 ступеням компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 при впрыске и без впрыска воды в проточную часть, полученных расчетным путем.

Варианты: (а), (б), (в) для 1, 7 и 14 ступеней при $n_{пр} = 100\%$;

(с), (д), (е) для 1, 7 и 14 ступеней при $n_{пр} = 80\%$.

Расчет ступени осевого компрессора ГТД АЛ-31СТ при «влажном сжатии» по программе *CompressorWI-2S* и сравнение с данными расчета в системе *Ansys CFX*

Как было отмечено в работах [1–3], расчет параметров по ступеням осевого компрессора при «влажном» сжатии по программе *CompressorWI-2S* осуществляется по среднему сечению лопаток при впрыске воды в его тракт с учетом ее сепарации на стенки корпуса, перепуска или отбора рабочего тела, возможного впрыска «перегретой» жидкости, неполной смачиваемости поверхностей лопаток РК и НА отдельных ступеней, регулирования режимов работы компрессора на пониженных оборотах с помощью поворотных лопаток. Достоинством программы является возможность работы с ней на персональных компьютерах, быст-

рота выполнения расчетов, когда даже для самых сложных вариантов задачи требуемое время вычислений не превышает одной минуты. Тем не менее всегда возникает вопрос о том, насколько получаемые результаты будут отличаться от результатов моделирования процесса сжатия в компрессоре при впрыске или попадании влаги в его проточную часть в трехмерной постановке с учетом чрезвычайно сложной гидродинамической картины течения, двухфазности потока с испарением жидкости как в капельной форме в потоке, так и с пленки жидкости на поверхностях лопаток и корпуса компрессора и ряда других факторов. Такая задача может выполняться, например, на основе универсальных программных систем *Ansys CFX* или *Ansys Fluent*, однако требует для своей реализации очень большого массива исходных данных, применения самых сложных вычислительных комплексов на уровне суперкомпьютеров, весьма значительного времени непрерывного счета вплоть до недель, что будет оправдано на заключительных этапах проектирования компрессора ГТД или наземных энергоустановок различного назначения на базе ГТД, а также при их доводке. Поэтому разработка и применение более простых программ, таких как *CompressorWI-2S*, вполне актуальны при их удовлетворительной точности.

В связи с этим на основе программного комплекса *Ansys CFX* было выполнено моделирование процесса «влажного» сжатия в 5 ступени осевого компрессора ГТД АЛ-31СТ (1 ступени КВД, существенно отличающейся по расходу воздуха от КНД, и принятому в расчетах равным 71,29 кг/с), причем по значительно упрощенной модели «мгновенного испарения» воды при впрыске в сечении перед этой ступенью. Расчеты включали в себя выявление полей давления, температуры, чисел Маха, векторов скоростей потока по среднему сечению высоты лопаток. В Табл. 2 представлены некоторые конечные результаты этих расчетов в части основных параметров потока – полных температуры, давления и степени повышения давления в ступени $\pi_{ст}^*$.

Таблица 2. Влияние впрыска воды в перед КВД ГТД АЛ-31СТ на полную температуру и давление рабочего тела в ступени компрессора.

Программа <i>CompressorWI-2S</i> , впрыск перед 5 ступенью КВД						
	Без впрыска			2% впрыска		
Параметры	Перед ступенью	За ступенью	Отношение параметров	Перед ступенью	За ступенью	Отношение параметров
T^* , К	428,0	472,1	1,10	428,0	463,0	1,08
P^* , Па	358964	482352	1,344	358964	480159	1,338
$\pi_{ст}^*$	1,344			1,338		
Программа <i>Ansys CFX</i> , впрыск перед 5 ступенью КВД						
	Без впрыска			2% впрыска		
Параметры	Перед ступенью	За ступенью	Отношение параметров	Перед ступенью	За ступенью	Отношение параметров
T^* , К	428,0	466,8	1,09	379,9	418,4	1,10
P^* , Па	360582	497149	1,379	360450	518425	1,438
$\pi_{ст}^*$	1,378			1,438		
Программа <i>DVIGwT</i> , впрыск перед 5 ступенью КВД						
	Без впрыска			2% впрыска		
Параметры	Перед ступенью	За ступенью	Отношение параметров	Перед ступенью	За ступенью	Отношение параметров
T^* , К	436,8	472,8	1,082	436,8	422,2	0,967
P^* , Па	363756	467427	1,285	363756	486706	1,338
$\pi_{ст}^*$	1,285			1,338		

Отметим, что общие закономерности изменения ключевых параметров потока в ступени при впрыске для расчетов по программам *CompressorWI-2S* и *Ansys CFX* аналогичны. При этом в отсутствие впрыска различие давления на входе 5 ступени составляет менее 0,5%, в выходном сечении менее 3%. Однако при впрыске 2% расхода воды степень повышения давления $\pi_{ст}^*$ при расчете по программе *Ansys CFX* примерно на 7% выше, чем при расчете по программе *CompressorWI-2S*. Хотя степени возрастания температуры в ступени различаются менее, чем на 2%, сами температуры на входе и выходе ступени при расчете в системе *Ansys CFX* примерно на 10% ниже. Эти различия вполне обоснованы, так как согласно расчетам по программе *CompressorWI-2S* в 5 ступени успевает испариться только 19% от расхода жидкости, в то время как при расчете в *Ansys CFX* согласно модели «мгновенного испарения» весь расход жидкости был испарен в сечении перед 5 ступенью компрессора, что привело к снижению температуры потока рабочего тела на 11,2% и возрастанию расхода паровоздушного потока.

Также отметим, что модель «мгновенного испарения» жидкости в сечении впрыска используется и в СИМ *DVIGwT* (автор И.М. Горюнов [5, 6]), поэтому для сравнения в Табл. 2 представлены и соответствующие результаты, причем для расчета «влажного» сжатия значения $\pi_{ст}^*$ для 5 ступени с учетом его повышения при впрыске 2% расхода воды и $\pi_{к}^*$ для КВД в целом принимались равными значениям, полученным при таком впрыске по программе *CompressorWI-2S*.

Различия в параметрах потока за 5 ступенью компрессора, полученные при расчетах по программе *CompressorWI-2S* и в системе *Ansys CFX* (см. Табл. 2), нашли отражение очевидно и на соответствующих параметрах на выходе из КВД:

– для первого варианта с учетом последовательного испарения воды в ряде ступеней КВД они имели значения $T_{к}^* = 717,2$ К; $P_{к}^* = 2480,97$ кПа; $\pi_{квд}^* = 6,91$;

– для второго варианта с расчетом по модели «мгновенного испарения» $T_{к}^* = 714,1$ К; $P_{к}^* = 2700,19$ кПа; $\pi_{квд}^* = 7,49$.

Соответственно отличаются и затраты мощности в КВД $N_{квд}$: 24828 кВт и 25032 кВт.

Таким образом, можно констатировать, что программа *CompressorWI-2S* позволяет получить более обоснованные результаты расчета параметров процесса «влажного» сжатия в осевых компрессорах ГТД, и это подтверждается указанными выше примерами сравнения с данными расчетных и экспериментальных исследований для ГТД АЛ-21Ф-3.

Оценка влияния впрыска на входе в осевой компрессор авиационного ГТД легко испаряемых жидких топлив

Помимо воды в проточную часть компрессора может осуществляться впрыск и иных жидкостей, в том числе смесей их с водой, а также горючих компонентов. Примеры представлены, например, в работах [11–15]. Перспективным, на взгляд авторов данной работы, является впрыск на входе осевого компрессора жидкого аммиака с температурой ниже 240 К, обладающего достаточно высокой удельной теплотой парообразования порядка $r = 1370$ кДж/кг и вполне значимой низшей теплотворной способностью $H_u = 18688$ кДж/кг [16], которая позволит при его сгорании сократить потребление основного топлива в камере сгорания. Другим вариантом является впрыск сжиженного природного газа (СПГ-топлива), имеющего не столь высокую, как у аммиака, удельную теплоту парообразования, равную $r = 512,4$ кДж/кг, но температуру жидкого состояния ниже 110 К и значительную низшую теплотворную способность порядка $H_u = 55500$ кДж/кг [17]. Наиболее целесообразным это может оказаться для авиационных ГТД малой мощности, а также в аспекте создания конверсионных энергоустановок наземного применения на базе авиационных ГТД, в том числе отработавших свой летный ресурс.

Аммиак и особенно СПГ, ввиду их низкой начальной температуры, способны к быстрому испарению уже при начальных температурах воздуха перед компрессором, поэтому для

более эффективного использования их охлаждающего ресурса рационально, в том числе и в техническом исполнении, осуществлять впрыск непосредственно на входе осевого компрессора. Цели анализа в этой части работы не были направлены на детальные поступенчатые расчеты параметров осевого компрессора при впрыске СПГ или аммиака, а на оценку параметров рабочего тела на выходе компрессора в связке с температурой газа T_r^* на выходе камеры сгорания.

Впрыск перед компрессором сжиженного природного газа (метана)

Принятое допущение о мгновенном испарении СПГ при впрыске с начальной температурой 110 К позволяет определить, с какой начальной температурой воздух в смеси с испаренным газом поступает в первую ступень компрессора и далее сжимается. Рассчитывались параметры на выходе компрессора и полная температура за камерой сгорания на примере ГТД АЛ-21Ф-3 при разных расходах СПГ-топлива (см. Табл. 3). Вполне очевидно, что с ростом расхода СПГ температура воздуха в начальном сечении T_b^* снижается более существенно, равно как и температура за компрессором, но при этом существенно растет и температура за камерой сгорания вследствие более высокой теплотворной способности СПГ по сравнению с основным топливом – авиационным керосином ТС-1 (см. Рис. 8).

Таблица 3. Влияние расхода СПГ, впрыскиваемого перед компрессором ГТД АЛ-21Ф-3, на параметры компрессора и температуру за камерой сгорания.

Параметры в компрессоре и камере сгорания	Расход жидкости, %				
	Без впрыска	2% СПГ	1,772% СПГ	1,5% СПГ	1% СПГ
T_b^* , К	288,15	267,2	272,6	272,2	277,4
T_k^* , К	617,4	597,5	599,3	602,3	607,2
P_k^* , Па	1080269	1225216	1210514	1187221	1150335
N_k , Вт	28976364,4	29535352	29478258	29393015	29251987
G_T , кг/с	1,9154	1,72	1,524	1,29	0,86
T_r^* , К	1373,1	1470,5	1373,1	1256,6	1049,5

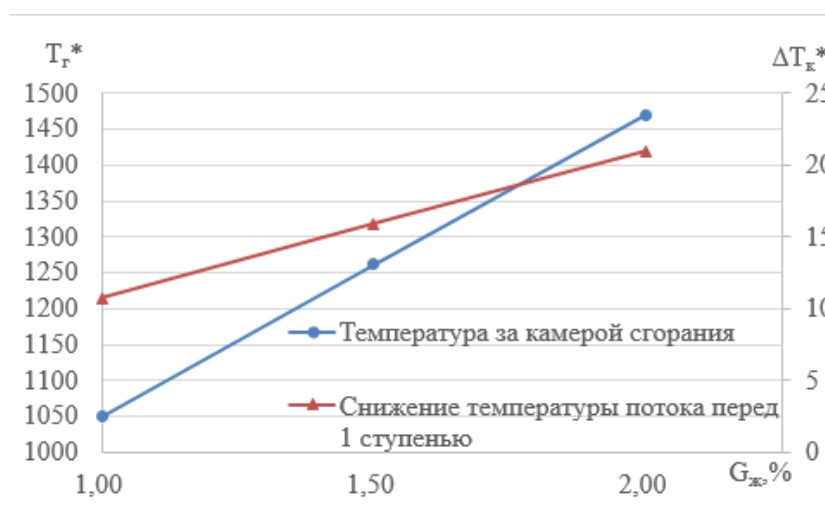


Рисунок 8. Влияние расхода впрыска СПГ перед компрессором ГТД АЛ-21Ф-3 на снижение температуры воздуха перед первой ступенью и температуру газа на выходе из камеры сгорания.

Также с ростом расхода СПГ возрастают полное давление за компрессором P_k^* и соответственно степень повышения давления π_k^* , а также потребляемая мощность N_k , но с учетом роста расхода потока удельные затраты мощности N_k/G_T снижаются. Все характерные особенности влияния впрыска горючей жидкости перед компрессором на параметры в его сечении на выходе аналогичны впрыску воды за исключением изменения температуры за камерой сгорания T_r^* .

В Табл. 3 также приведены данные для варианта расхода впрыска СПГ, равного 1,772 % от расхода воздуха, что соответствовало температуре T_r^* , идентичной варианту сжатия воздуха без впрыска жидкости. При этом температура потока перед компрессором снизилась на 15,6 К, за компрессором на 18,1 К, полное давление и π_k^* возросли на 12,1 %, затраты удельной мощности снизились на 0,32%. Расход топлива в ГТД сократился при этом на 20,43%, но он обусловлен большей теплотворной способностью СПГ-топлива.

Впрыск аммиака перед компрессором

Аналогичные расчеты были выполнены для варианта с впрыском жидкого аммиака перед компрессором ГТД АЛ-21Ф-3 с расходом 2% по отношению к расходу воздуха (1,72 кг/с NH_3). Их результаты представлены в табл. 4 в сравнении с впрыском идентичного расхода воды при одинаковых условиях впрыска. Здесь G_T кг/с – расход основного топлива: авиационного керосина.

Таблица 4. Влияние расхода аммиака, впрыскиваемого перед компрессором ГТД АЛ-21Ф-3, на параметры компрессора и температуру за камерой сгорания.

Параметры в компрессоре и камере сгорания	Расход жидкости, %				
	Без впрыска	2% NH_3	2% NH_3	2% NH_3	2% H_2O
T_v^* , К	288,15	260,1	260,1	260,1	288,15
T_k^* , К	617,4	590,7	590,7	590,7	562,3
P_k^* , Па	1080269	1094221	1094221	1094221	1139676
N_k , Вт	1,9154	1,00	1,2604	1,50	2,126
G_T , кг/с	1373,1	1470,5	1373,1	1256,6	1373,1

Вариацией его расхода подобрано значение $G_T = 1,2604$ кг/с, при котором с учетом сгорания в камере сгорания и аммиака обеспечивается идентичная температура $T_r^* = 1373,1$ К. Тогда экономия основного топлива составляет 34,2%. Приведенные в табл. 4 данные и для впрыска 2% воды свидетельствуют о том, что при этом расход топлива, наоборот, возрастает на 11%. Вместе с тем впрыск воды перед компрессором вследствие отличий в ее теплофизических свойствах обеспечивает более значимое снижение температуры сжимаемого воздуха и повышение давления и степени повышения давления в компрессоре π_k^* .

Заключение

В данной статье на примере осевых компрессоров двигателей ГТД АЛ-21Ф-3 и АЛ-31СТ выполнены расчетные исследования процесса «влажного сжатия» при впрыске жидкости в их проточную часть с применением программы *CompressorWI-2S* или в комплексе ее с СИМ *DVIGwT*. На примере ГТД АЛ-21Ф-3 показано влияние такого впрыска на характеристики осевого компрессора в сравнении с экспериментальными данными, полученными при испытаниях на стендах ЦИАМ им. П.И. Баранова, проанализировано влияние это-

го фактора на изменение углов обтекания потоком профилей лопаток ступени компрессора. На примере ступени осевого компрессора ГТД АЛ-31СТ проведен сравнительный анализ изменения при впрыске воды параметров рабочего тела, рассчитываемых по программе *CompressorWI-2S* и в системе *Ansys CFX* (в варианте упрощенной модели «мгновенного испарения»). Осевого компрессор ГТД АЛ-21Ф-3 использован как модельный также для проведения оценки вариантов впрыска на входе компрессора аммиака и СПГ-топлива как охладителей сжимаемого воздуха и топлива в камере сгорания.

Литература:

1. Ма Цзяжуй, Бакиров Ф.Г. Анализ различных вариантов впрыска воды в тракт компрессора ГТД на основе программы *CompressorWI* // Вестник УГАТУ. 2024. Т. 28. № 1(103). С. 56–68. [Ma Jiarui, Bakirov F.G. Analysis of different variants of water injection into GTE compressor path based on the *CompressorWI* programme // Vestnik UGATU. 2024. Vol. 28. No. 1(103). P. 56–68 (in Russian)].
2. Ма Цзяжуй, Бакиров Ф. Г., Горюнов И. М. Анализ эффективности впрыска перегретой воды в тракт компрессора ГТД на основе программы *CompressorWI* // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2024. № 2(69). С. 17–25. [Ma J., Bakirov F.G., Goryunov I.M. Effectiveness analysis of hot water injection into the GTE compressor passage way based on the *Compressor WI* program // Vestnik RGATA imeni P.A. Solovieva. 2024. No. 2(69). P. 17–25].
3. Ма Цзяжуй, Бакиров Ф. Г. Программа *CompressorWI-2S* для расчета «влажного» сжатия в осевом компрессоре ГТД с впрыском воды в его тракт, с учетом сепарации воды, перепуска или отбора рабочего тела // Вестник УГАТУ. 2024. Т. 30. № 3(105). С. 110–115. [Ma Jiarui, Bakirov F.G. *CompressorWI-2S* software for calculating the “wet” compression in the axial compressor of a GTE with water injection into its path, taking into account water separation, bypass or extraction of the working medium // Vestnik UGATU. 2024. Vol. 30. No. 3(105). P. 110–115 (in Russian)].
4. Бакиров Ф.Г., Ма Цзяжуй, Бакиров Р.Ф., Ахтямова О.Ф. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024668838 «Программа для расчета компрессора с впрыском воды, учетом сепарации и перепуска между ступенями *Compressor WI-2S*». 12.08 2024. Москва: РОСПАТЕНТ, 2024. [Bakirov F.G., Ma Jiarui, Bakirov R.F., Akhtyamova O.F. Certificate of state registration of computer program No. 2024668838 “Compressor WI-2S software for calculating the parameters of a compressor with water injection, taking into account separation and bypass between stages”. 12.08 2024. Moscow: ROSPATENT, 2024 (in Russian)].
5. Горюнов И.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2004610623 «Система математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок (DVIGwT)». 04.03.2004. Москва: РОСПАТЕНТ, 2004. [Goryunov I.M. Certificate of state registration of computer program No. 2004610623 “System for mathematical modeling of thermal, energy, and combined units (DVIGwT)”. 04.03.2004. Moscow: ROSPATENT, 2004 (in Russian)].
6. Горюнов И.М. Термогазодинамические расчеты в программном комплексе DVIGwT: учебное пособие [электронный ресурс]. Уфа: УГАТУ, 2022. [Goryunov I.M. Thermogasdynamic calculations in the DVIGwT software package: textbook [webpage]. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2022 (in Russian)].
7. Беляев В. Е., Серeda С.О., Гельмедов Ф. Ш., Мунтянов И. Г., Мунтянов Г.Л. Результаты испытаний компрессора установки МЭС-60 с впрыском воды в проточную часть // Газотурбинные технологии. 2005. № 4(39). С. 16–20. [Belyaev V.E., Sereda S.O., Gelmedov F.Sh., Muntyanov I.G., Muntyanov G.L. Results of tests of the compressor of the MES-60 unit with water injection into the flow path // Gasoturbinnye Tekhnologii. 2005. No. 4(39). P. 16–20 (in Russian)].
8. Серeda С.О., Гельмедов Ф.Ш., Мунтянов И.Г. Экспериментальное исследование влияния впрыска воды во входной канал многоступенчатого осевого компрессора на его характеристики // Теплоэнергетика. 2004. № 5. С. 66–71. [Sereda S.O., Gel'medov F.S., Muntyanov I.G.

Experimental study of the effect of water injection into the inlet channel of a multistage axial compressor on its characteristics // *Teploenergetika*. 2004. No. 5. P. 66–71 (in Russian)].

9. Середа С.О., Гельмедов Ф.Ш., Сачкова Н.Г. Расчетные оценки изменения характеристик многоступенчатого осевого компрессора под влиянием испарения воды в его проточной части // *Теплоэнергетика*. 2004. № 11. С. 60–65. [Sereda S.O., Gel'medov F.Sh., Sachkova N.G. Calculated assessments of the changing characteristics of a multistaged axial compressor due to the effect of water evaporation in its flow path // *Teploenergetika*. 2004. No. 11. P. 60–65 (in Russian)].

10. Беркович А.Л., Полищук В.Г., Рассохин В.А. Впрыск воды в компрессор ГТУ: монография. СПб.: Политехнический ун-т, 2010. 154 с. [Berkovich A.L., Polischuk V.G., Rassokhin V.A. Water injection into a gas turbine compressor: monograph. St. Petersburg: Polytechnic University, 2010. 154 p. (in Russian)].

11. Иванов А.А., Ермаков А.Н. Патент RU 2517995C2 от 10.06.2014. Газотурбинная установка с впрыском жидкости в контур ГТУ. М.: РОСПАТЕНТ, 2014. [Ivanov A.A., Ermakov A.N. Patent RU 2517995C2. 10. 06.2014. Gas turbine unit with liquid injection into the GTU circuit. Moscow: ROSPATENT, 2014 (in Russian)].

12. Староверов Н.Е. Патент RU 2523510C1 от 20.07.2014. Способ форсажа газотурбинного двигателя. М.: РОСПАТЕНТ, 2014. [Staroverov N.E. Patent RU 2523510C1. 20.07.2014. Method of boosting a gas turbine engine. Moscow: ROSPATENT, 2014 (in Russian)].

13. Староверов Н.Е. Патент RU 2474718C1 от 10.02.2013. Способ форсажа турбодвигателя и двигатель для реализации (варианты) [Staroverov N.E. Patent RU 2474718C1. 10.02.2013. Method for boosting a turbo engine and an engine for implementing it (variants)].

14. Вьюнов С.А., Гусев А.В., Карпов А.В. и др. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: учебное пособие. М.: Машиностроение, 1989. 368 с. [Vyunov S.A., Gusev A.V., Karpov A.V., et al. Design and construction of aircraft gas turbine engines: textbook. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989. 368 p. (in Russian)].

15. Chengkun Lv, Haiqi Xu, Fuxu Quan, Juntao Chang, Daren Yu. Thermodynamic modeling and analysis of ammonia injection pre-compressor cooling cycle: A novel scheme for high Mach number turbine engines // *Energy Conversion and Management*. 2022. Volume 265. Art. 115776. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115776.

16. Охрана труда и промышленная безопасность [электронный ресурс]. Occupational rights and safety [webpage] (in Russian). URL: <https://prom-nadzor.ru/content/pozharo-i-vzryvoopasnost-ammiachnyh-obektov>.

17. Григорьев Е.Г., Зубарев А.А., Колубаев Б.Д., Ерохов В.И. Газобаллонные автомобили. М.: Машиностроение, 1989. [Grigoriev E.G., Zubarev A.A., Kolubaev B.D., Erokhov V.I. Gas-cylinder cars. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989 (in Russian)].

Об авторах:

МА Цзяжуй, аспирант ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий». E-mail: jiarui2015@yandex.ru.

БАКИРОВ Фёдор Гайфуллович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий». E-mail: fgbakirov@bk.ru.

ГОРЮНОВ Иван Михайлович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий». E-mail: gorjunov@mail.ru.

Metadata:

Title: On the influence of liquid injection into the flow path of axial compressors of gas turbine engines on the process of “wet compression”.

Author 1: Jiarui Ma, postgrad. student, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validy st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, E-mail: jiarui2015@yandex.ru.

Author 2: Fyodor Gayfullovich Bakirov, Dr. Tech. Sciences, Professor, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validy st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, E-mail: fgbakirov@bk.ru.

Author 3: Ivan Mikhailovich Goryunov, Dr. Tech. Sciences, Professor, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validy st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, E-mail: gorjunov@mail.ru.

Abstract: The effect of liquid injection into the flow path of an axial blade compressor of a gas turbine engine or gas turbine unit on compressor parameters is examined using numerical simulations by CompressorWI-2S software. The calculation results are presented in tables and graphical form.

Keywords: axial compressor; gas turbine engine; liquid injection; compressor parameters and characteristics; program for calculating parameters; calculation results; tables and graphs; analysis of results.