

УДК 621.4, 536.71

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ВПРЫСКА ВОДЫ В ТРАКТ КОМПРЕССОРА ГТД НА ОСНОВЕ ПРОГРАММЫ COMPRESSORWI

МА Цзяжуй¹, Ф.Г. БАКИРОВ²

¹jiarui2015@yandex.ru, ²fgbakirov@bk.ru

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

Поступила в редакцию 25.12.2023

Аннотация. Рассматривается влияние различных вариантов впрыска воды в тракт осевого лопаточного компрессора ГТД или ГТУ, а также режимных параметров на её поступенчатое испарение и параметры компрессора на основе численного моделирования по разработанной авторами программе *CompressorWI* в среде *Visual Studio 2022*. Результаты расчетов представлены в виде таблиц и в графической форме.

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

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматриваются и анализируются результаты численных расчетов процессов при так называемом «влажном сжатии» в осевом лопаточном компрессоре, выполненных по программе *CompressorWI*, описание которой приведено в работах [1, 2]. Программа позволяет осуществлять поступенчатый расчет компрессора и определять параметры потока на выходе компрессора как с учетом попадания жидкости и пара на входе в него вместе с потоком воздуха, так и специального впрыска воды в разных сечениях по тракту компрессора. Аналитическое описание протекающих физических процессов, заложенное в программе, позволяет моделировать как процессы испарения жидкости и изменения параметров двухфазного потока (влажного воздуха и воды), так и гидравлические потери в потоке, связанные с движением пленки, её образованием и испарением на поверхностях рабочих лопаток и лопаток направляющих аппаратов, дроблением пленок с превращением их в капли при их срыве с выходных кромок лопаток, разгоном капель, что в совокупности влияет на параметры потока и общие затраты удельной работы и мощности в компрессоре. Программа *CompressorWI* может быть использована как на этапе проектирования осевого лопаточного компрессора, когда геометрические характеристики компрессора еще только формируются, так и применительно к существующему компрессору ГТД или ГТУ с известной поступенчатой геометрией лопаток. Последний вариант и рассматривается в данной работе.

В качестве базового для проведения расчетов по программе и отработки самой программы использовался 14-ступенчатый осевой компрессор двигателя АЛ-21, для которого известны и приводятся в научно-технических публикациях геометрические размеры по тракту компрессора, некоторые варианты стендовых испытаний с впрыском воды на входе и в его тракте, а также результаты моделирования другими авторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ПРОГРАММЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПОДВОДА ВОДЫ В КОМПРЕССОР

При проведении численных расчетов по программе *CompressorWI* исследовалось влияние следующих параметров:

- параметры, характеризующие режимы работы компрессора и двигателя или энергоустановки: φ – относительная влажность воздуха на входе в компрессор в %; T_0 – температура воздуха на входе в компрессор, °К; n – частота вращения турбокомпрессора, 1/мин;

- параметры, характеризующие впрыск жидкости в тракт компрессора: $G_{ж}$ – расход впрыскиваемой жидкости в кг/с или в процентах от расхода воздуха; место впрыска жидкости в тракт компрессора; d – медианный диаметр впрыскиваемых капель, мкм; $T_{ж0}$ – температура впрыскиваемых капель жидкости, К.

Таблица результатов поступенчатого расчета компрессора включает в себя до 44 параметров, характеризующих процесс сжатия двухфазного потока с испарением жидкости в тракте. Но в данной статье проанализируем влияние различных вариантов впрыска жидкости на несколько наиболее значимых параметров, к которым относятся полное давление P_k , Па; температура смеси T_k , К; потребляемая мощность N_k , Вт; медианный диаметр капель d , мкм и количество капель жидкости в потоке n_k как по ступеням компрессора, так и в выходном сечении компрессора.

Ввиду большого числа параметров, характеризующих режимы работы компрессора и условия впрыска жидкости, выбран один базовый вариант, по сравнению с которым анализируется влияние изменения отдельных параметров на процесс «влажного сжатия» в компрессоре:

$T_0 = 288,15$ °К; $P_0 = 101325$ Па (760 мм. рт. ст.); $T_{ж0} = 288,15$ °К; $\varphi = 30\%$; $d = 40$ мкм; $n = 7300$ 1/мин; расход воздуха $G_{в} = 86$ кг/с.

Для сравнения, естественно, используются и данные расчетов без впрыска жидкости. Также отметим, что рассматриваются стендовые условия работы: высота $H = 0$ и число Маха $M = 0$, применительно к которым имеются результаты испытаний.

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ПРИ ВПРЫСКЕ НА ВХОДЕ КОМПРЕССОРА

При проведении численных экспериментов расход воды, подаваемой на входе в 1 ступень компрессора, задавался в количестве 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 % от массового расхода поступающего воздуха 86 кг/с. Пример данных расчета для 2 % расхода воды по ступеням компрессора в сравнении с соответствующими данными расчета без впрыска показан в табл. 1. Для сокращения данные для нечетных ступеней компрессора, начиная с 3-й ступени, в таблице не отражены. Более детальные данные представлены графически на рис. 1 – 4. Также в табл. 2 представлены значения этих параметров в выходном сечении компрессора.

Таблица 1

Результаты расчетов компрессора при впрыске различных расходов воды перед компрессором

Вариант 1		Без впрыска жидкости						
№ ст.	1	2	4	6	8	10	12	14
T , °К	304,3	321,4	358,4	411,9	477,7	535,1	580,5	617,1
P_k , Па	116832	136765	191151	304538	498330	708981	903927	1080843
N_k , Вт	1385545	1475917	1648057	1676516	2848684	2422699	1902037	1557800
n_k , 1/с	0	0	0	0	0	0	0	0
d_k , мкм	0	0	0	0	0	0	0	0
Вариант 2		Впрыск жидкости перед компрессором с 2% расхода, 40 мкм размер капель и $\varphi=30\%$						
№ ст.	1	2	4	6	8	10	12	14
T , °К	303,3	318,6	351	393,9	441,8	481,0	526,0	562,3
P_k , Па	116281,8	135123	186670,7	296644,7	4982831,1	719063,9	938238,9	1139676
N_k , Вт	1385687	1476503	1650397	2687888	2878591	2466488	1939333	1588300
n_k , 1/с	5,13E+13	1,38E+12	2,33E+12	4,08E+12	5,28E+12	3,94E+12	0	0
d_k , мкм	40	13,366	11,066	8,872	7,186	5,496	0	0

Таблица 2

Некоторые параметры потока на выходе из компрессора при различных расходах впрыска жидкости на входе в компрессор

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
Расход впрыска воды	Без впрыска	0,5% от расхода воздуха	1,0% от расхода воздуха	1,5% от расхода воздуха	2,0% от расхода воздуха	2,5% от расхода воздуха	3,0% от расхода воздуха
φ	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)
d , мкм	-	40	40	40	40	40	40
$T_{ж0}$, °К	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15
T_0 , °К	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15
T_k , °К	617,1	604	588	574	562,3	545,9	533,3
P_k , Па	1080843	1107299	1122891	1132843	1139676	1148230	1153586
N_k , Вт	1557800	1565041	1573905	1581985	1588300	1597737	1604630
n_k , 1/с	0	0	0	0	0	0	0
d_k , мкм	0	0	0	0	0	0	0

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Впрыск воды перед компрессором приводит к снижению температуры смеси по тракту вследствие затраты части энтальпии сжимаемого воздуха на испарение воды, обладающей высокой удельной теплотой парообразования γ порядка 2000 кДж/кг (см. рис. 1). Так, при впрыске до 3 % расхода воды по отношению к расходу воздуха относительное снижение температуры достигает 13,58 %, а для 2 % расхода воды составляет 8,88 %. Как видно по данным табл. 1 и рис. 1, по тракту компрессора более значимое влияние проявляется, начиная с 4 ступени компрессора, когда температура потока вследствие сжатия воздуха более сильно влияет на испарение воды.

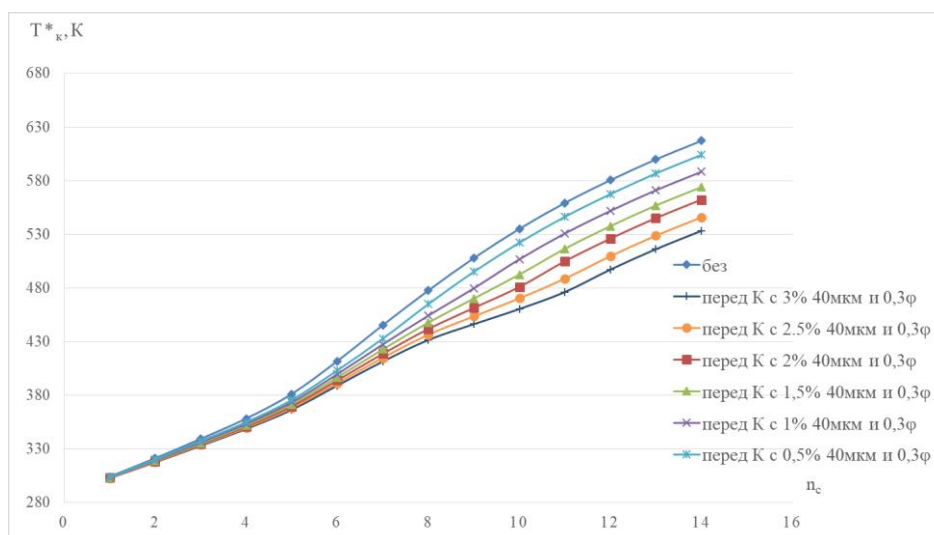


Рис. 1. Температура смеси за ступенями компрессора при впрыске жидкости на входе компрессора с различными расходами.

2. Полное давление смеси в потоке за компрессором при впрыске воды с расходом 3 % возрастает на 6,73 %, а для расхода 2 % на 4,81 % по сравнению с повышением давления в компрессоре при отсутствии впрыска (см. табл. 2 и рис. 2). Это объясняется как повышением общего расхода рабочего тела в компрессоре, так и влиянием вышеуказанных гидравлических

сопротивлений для жидкой фазы. Соответственно, на эти же величины возрастает и степень повышения давления в компрессоре π_k . Данные табл. 1 и более детальные результаты расчетов по всем ступеням показывают, что при впрыске воды на начальных ступенях компрессора 1 – 4 степень повышения давления по ступеням снижается по сравнению с процессом сжатия без впрыска жидкости, а в последующих, наоборот, повышается. Объясняется это тем, что на первых ступенях компрессора из-за недостаточной температуры сжимаемого воздуха испарение воды слабое, а жидкая фаза повышает потери на гидравлические сопротивления.

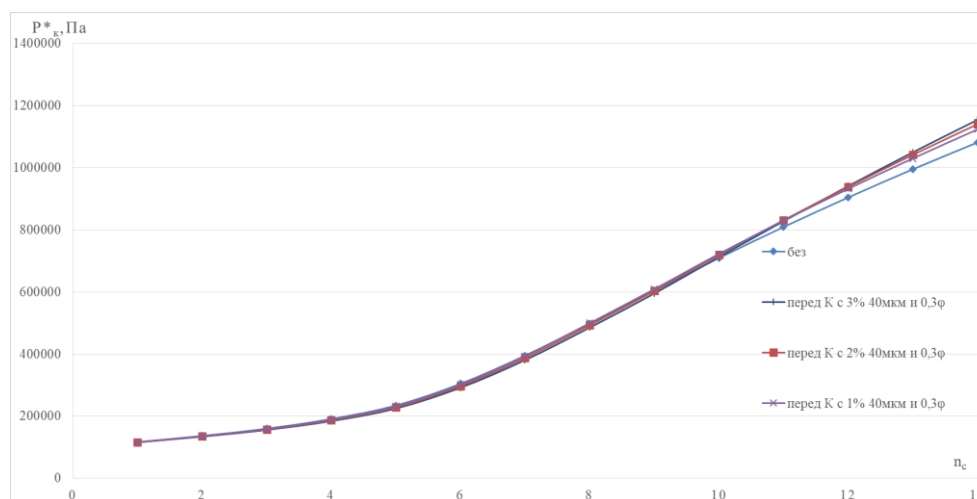


Рис. 2. Давление смеси за ступенями компрессора при впрыске жидкости на входе компрессора с различными расходами.

3. Вопреки ожиданию, как видно из табл. 2 и рис. 2, при впрыске жидкости затраты мощности на «влажное сжатие» несколько выросли. Это относится как к отдельным ступеням (см. данные табл. 2 и рис. 3), так и к компрессору в целом. Так, для рассматриваемых условий затраты мощности в компрессоре составили при отсутствии впрыска 28972990 Вт, при впрыске воды в количестве 0,5 % - 29067478 Вт (+ 0,33%); 1,0 % – 29150640 Вт (+ 0,61%); 1,5 % – 29217027 Вт (+0,84%); 2,0 % – 29270709 Вт (+1,03%); 2,5 % – 29333657 Вт (+1,24%); 2,5 % – 29383564 Вт (+1,72%).

Но увеличение затрат мощности в компрессоре при этом объясняется рядом причин: во-первых, само увеличение расхода рабочего тела за счет впрыска требует для сжатия эквивалентного роста мощности. При этом проценты прироста расхода за счет впрыска воды заметно выше, чем увеличение мощности. Во-вторых, водяной пар имеет значительно большую изобарную теплоемкость и соответственно энтальпию, что также увеличивает затраты мощности на сжатие при равных π_k . В-третьих, рост степени повышения давления при впрыске воды также увеличивает затраты мощности на сжатие; и наконец, в-четвертых, появление дополнительных гидравлических сопротивлений в жидкой фазе также требует дополнительных затрат мощности в компрессоре.

Для сравнительных оценок приведем значения потребных затрат мощности в компрессоре при сжатии воздуха без впрыска воды, но при повышенных расходах и π_k , соответствующих вариантам со впрыском жидкости:

- расход воздуха $G_B = 86,43$ кг/с; $\pi_k = 11,04$; $N_k = 29486602$ Вт – это эквивалент впрыску жидкости 0,5 %;
- $G_B = 86,86$ кг/с; $\pi_k = 11,19$; $N_k = 29873118$ Вт — для впрыска 1,0 %;
- $G_B = 87,29$ кг/с; $\pi_k = 11,30$; $N_k = 30172708$ Вт — для впрыска 1,5 %;
- $G_B = 87,72$ кг/с; $\pi_k = 11,36$; $N_k = 30425503$ Вт — для впрыска 2,0 %;
- $G_B = 88,15$ кг/с; $\pi_k = 11,45$; $N_k = 30704860$ Вт — для впрыска 2,5 %;
- $G_B = 88,58$ кг/с; $\pi_k = 11,50$; $N_k = 30937406$ Вт — для впрыска 3,0 %.

Эти значения существенно выше, чем приведенные выше рассчитанные по программе *CompressorWI* значения потребляемой мощности компрессора N_k , например, для 2 % впрыскиваемой жидкости – на 3,94 %, для 3 % впрыска – на 5,29 %. Это, с одной стороны, подтверждает, что впрыск жидкости в тракт компрессора снижает затраты мощности на сжатие рабочего тела, с другой стороны, повышение его расхода и τ_k приведут в последующем к повышению работоспособности потока, поступающего в турбину.

На рис. 4а и 4б показаны рассчитанные по программе данные о количестве частиц и диаметрах капель жидкости по ступеням компрессора для различных относительных расходов впрыска. Они отчетливо показывают, что уже после 1 ступени компрессора капельный режим испарения переходит в преобладающий пленочный, и размеры самих капель определяются в основном процессом срыва пленки с кромок лопаток и расходом впрыскиваемой жидкости, а сама степень испарения по ступеням термодинамически ограничивается $\varphi(P, T) = 100\%$. Видно также наглядно по рис. 4б, что расход жидкости до 3 % по отношению к расходу воздуха в данном компрессоре способен полностью испариться в тракте компрессора.

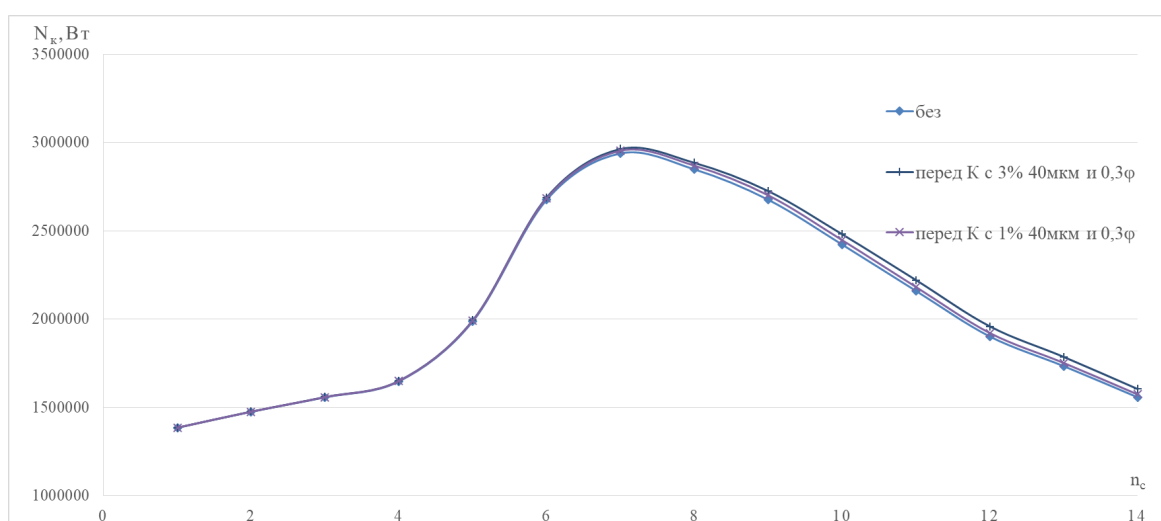


Рис. 3. Мощность компрессора по ступеням при впрыске жидкости на входе компрессора с различными расходами.

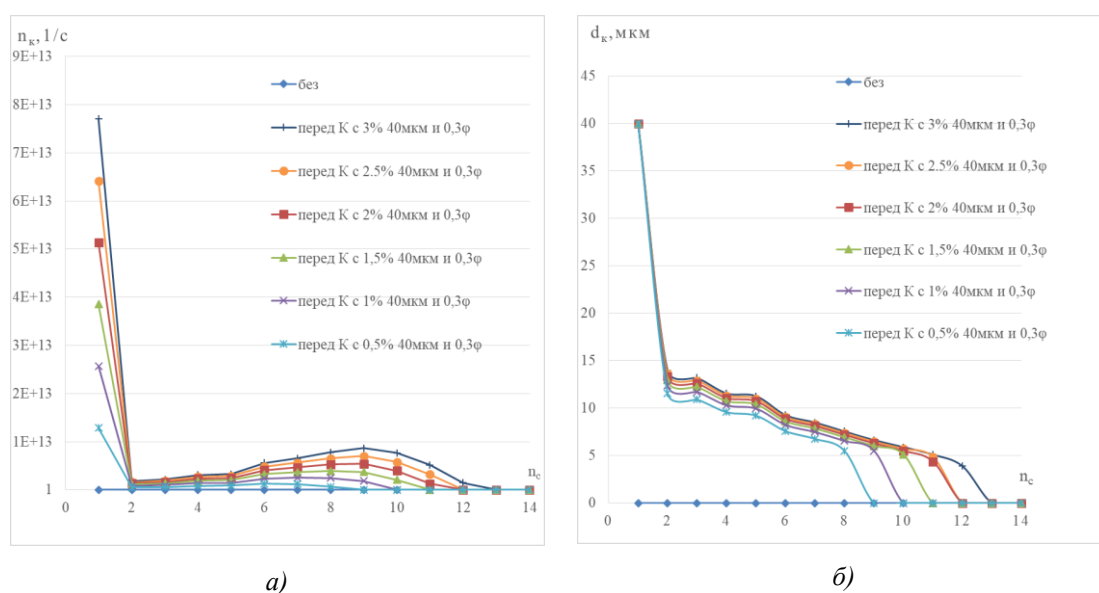


Рис. 4. а) – количество капель жидкости по ступеням при впрыске жидкости на входе компрессора с различными расходами; б) – диаметры капель жидкости по ступеням при впрыске жидкости на входе компрессора с различными расходами.

ВЛИЯНИЕ МЕСТА ПОДВОДА ЖИДКОСТИ ПРИ ВПРЫСКЕ В ТРАКТ КОМПРЕССОРА

Как показали результаты численных экспериментов, другим весьма значимым фактором для процесса «влажного сжатия» в компрессоре является сечение впрыска воды по тракту компрессора. Были смоделированы варианты впрыска жидкости в тех же 2 % расхода на входе в 1, 4, 8 и 12 ступенями компрессора, а также распределение этого расхода воды равномерно в четырех указанных сечениях по тракту компрессора. В табл. 3 эти данные по ступеням компрессора приведены для расхода впрыскиваемой воды 2 %, а в табл. 4 – для сечения на выходе компрессора при различных вариантах впрыска и добавлены также данные для полной мощности, потребляемой в компрессоре, при разных сечениях по тракту, где осуществлялся впрыск воды.

Таблица 3

Результаты расчетов параметров по ступеням при впрыске воды в различных сечениях по тракту компрессора

Вариант 3		Впрыск жидкости на входе 4 ступени компрессора с 2 % расхода, 40 мкм размер капель и φ=30 %						
№ ст.	1	2	4	6	8	10	12	14
T, °К	304,2	321,4	355,6	397,8	444,8	483,5	528,5	564,8
P _к , Па	116832	136764	189933	300077	496287	722411	941363	114246
N _к , Вт	1385545	1475917	1648757	2686013	2877559	2466219	1939188	1588182
n _к , 1/с	0	0	2,61E+11	4,10E+12	5,30E+12	3,94E+12	0	0
d _к , мкм	0	0	23,255	8,980	7,253	5,533	0	0
Вариант 4		Впрыск жидкости на входе 8 ступени компрессора с 2 % расхода, 40 мкм размер капель и φ=30 %						
№ ст.	1	2	4	6	8	10	12	14
T, °К	304,2	321,4	358,4	411,9	463,0	489,4	526,6	562,9
P _к , Па	116832	136764	191151	304538	496051	712210	926480	1124885
N _к , Вт	1385545	1475917	1648057	2676516	2856957	2460509	1943135	1591417
n _к , 1/с	0	0	0	0	2,61E+11	6,30E+12	0	0
d _к , мкм	0	0	0	0	23,255	6,241	0	0
Вариант 5		Впрыск жидкости на входе 12 ступени компрессора с 2 % расхода, 40 мкм размер капель и φ=30 %						
№ ст.	1	2	4	6	8	10	12	14
T, °К	304,2	321,4	358,4	411,9	477,6	535,0	544,4	550,5
P _к , Па	116832	136764	191151	304538	498330	708981	901714	1090247
N _к , Вт	1385545	1475917	1648057	2676516	2848684	2422699	1916374	1597651
n _к , 1/с	0	0	0	0	0	0	2,61E+11	4,08E+12
d _к , мкм	0	0	0	0	0	0	23,255	4,531
Вариант 6		Распределенный впрыск жидкости в 4 сечениях компрессора с 2 % расхода суммарно, 40 мкм размер капель и φ=30 %						
№ ст.	1	2	4	6	8	10	12	14
T, °К	303,9	320,3	354,6	400,6	451,5	492,5	523,5	559,7
P _к , Па	116694,7	136360,1	190126,7	302780,1	500929,0	725792,0	941549	1144255
N _к , Вт	1385613,6	1476215,4	1649568,0	2684795,4	2871555,0	2459380,6	1939026	1592702
n _к , 1/с	1,28E+13	5,30E+11	1,34E+13	2,38E+12	1,53E+13	3,06E+12	1,28E+13	0
d _к , мкм	40	11,530	53,353	8,262	52,989	5,428	93,023	0

Результаты моделирования, приведенные в табл. 3 и 4, на рис. 5, для различных вариантов выбора места впрыска показывают, что вследствие полного испарения 2% расхода жидкости

в тракте температура потока на выходе из компрессора различается менее, чем на 1%. Исключение составляет лишь впрыск перед 12 ступенью, когда вода не успевает полностью испариться до выходного сечения компрессора.

Также незначительно, менее 0,5%, изменяется и суммарная мощность, потребляемая компрессором, наименьшая при впрыске перед 8 ступенью. Однако впрыск перед 4 ступенью позволяет получить наибольшую температуру, давление и π_k на выходе компрессора (см. табл. 4), что более благоприятно для характеристик ГТД или ГТУ в целом.

Таблица 4

Некоторые параметры потока на выходе из компрессора при различных сечениях впрыска жидкости по тракту

Вариант	1	2	3	4	5	6
Места впрыска	Без впрыска	Перед компрессором	На входе 4 ступени	На входе 8 ступени	На входе 12 ступени	В 4 сечениях компрессора
Расход впрыска воды	Без впрыска	2% от расхода воздуха	2% от расхода воздуха	2% от расхода воздуха	2% от расхода воздуха	2% от расхода воздуха
φ	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)
d , мкм	-	40	40	40	40	40
$T_{ж0}$, °К	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15
T_0 , °К	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15
T_k , °К	617,1	562,3	564,8	562,9	550,5	559,7
P_k , Па	1080843	1139676	1142456	1124884	1090247	1144255
N_k , Вт	1557800	1588	1588181	1591417	1597651	1592702
n_k , 1/с	0	0	0	0	4,08E+12	0
d_k , мкм	0	0	0	0	4,531	0

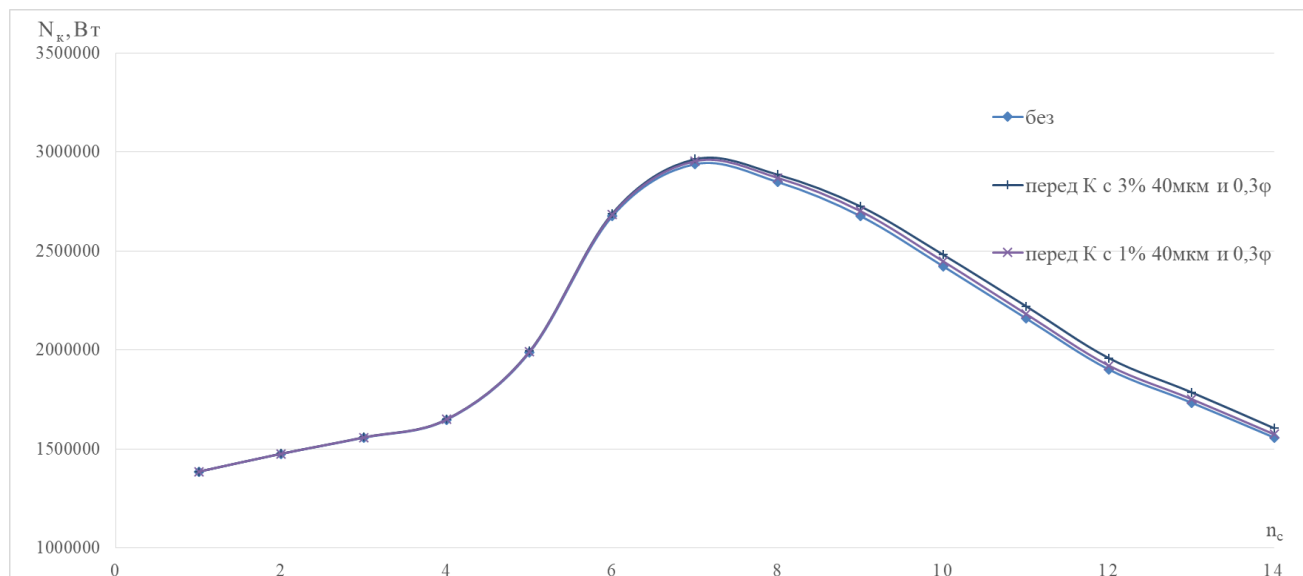


Рис. 5. Температуры смеси за ступенями компрессора при различных способах впрыска жидкости в количестве 2% от расхода воздуха.

На рис. 6а и 6б представлены данные о количестве, размерах капель жидкости по ступеням в тракте компрессора. Они также подтверждают, что независимо от места впрыска капельный режим испарения уже с последующей ступени переходит в преимущественно пленочный.

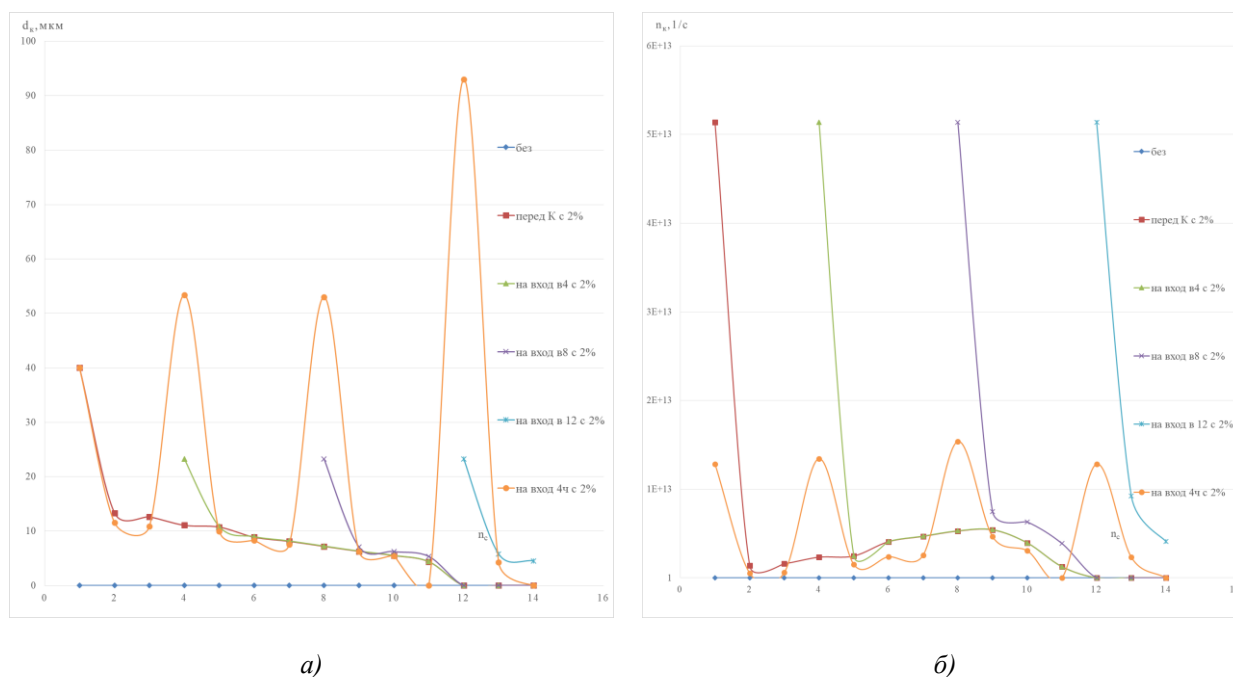


Рис. 6. а) – количество капель жидкости по ступеням при различных способах впрыска жидкости в количестве 2% от расхода воздуха; б) – диаметры капель жидкости по ступеням при различных способах впрыска жидкости в количестве 2% от расхода воздуха.

Обобщая в целом вопрос о влиянии места впрыска воды в тракт компрессора при сохранении его расхода, можно подчеркнуть, что воздух в начальных ступенях компрессора недостаточно нагрет для эффективного испарения жидкости, из-за низкого парциального давления паровой фазы быстро достигается $\phi(P, T) = 100\%$, также более значима сепарация капель на стенки корпуса вследствие влияния центробежных сил и недостаточной несущей способности потока. Поэтому более эффективным является для данного компрессора впрыск воды в диапазоне 4 – 8 ступеней.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ ПР ВПРЫСКЕ В ТРАКТ КОМПРЕССОРА

Численные расчеты по оценке влияния размеров впрыскиваемых капель жидкости для базового варианта по остальным параметрам, в частности, расхода впрыска жидкости в 2%, были выполнены в диапазоне диаметров капель 15 – 60 мкм. Рассматривался впрыск перед 1 ступенью компрессора. Результаты расчетов для параметров на выходе компрессора приведены в табл. 5, а на рис. 7 представлены данные о размерах частиц графически по ступеням компрессора. Здесь также подтверждается, что независимо от начального размера капель уже со 2 ступени испарение переходит на пленочный режим, и диаметр срывааемых с кромок лопаток капель становится примерно 13 – 15 мкм.

Как видно из табл. 5, при изменении диаметра капель от 15 до 60 мкм различие в давлении на выходе компрессора составляет всего 0,3 %, а по затратам мощности на сжатие – практически нулевое.

**Некоторые параметры потока на выходе из компрессора
при различных размерах капель жидкости в тракт компрессора**

Вариант	1	2	3	4	5
Диаметр капель d , мкм	-	15	25	40	60
Расход впрыска воды	Без впрыска	2% от расхода воздуха	2% от расхода воздуха	2% от расхода воздуха	2% от расхода воздуха
φ	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)	0,3(30%)
$T_{ж0}$, °К	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15
T_0 , °К	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15
T_K , °К	617,1	562,2	562,2	562,3	562,4
P_K , Па	1080843	1136620	1138711	1139676	1140150
N_K , Вт	1557800	1588188	1588270	1588300	1588315
n_K , 1/с	0	0	0	0	0
d_K , мкм	0	0	0	0	0
$N_{K\text{СУМ}}$, Вт	28972989	29269447	29270093	29270709	29271013

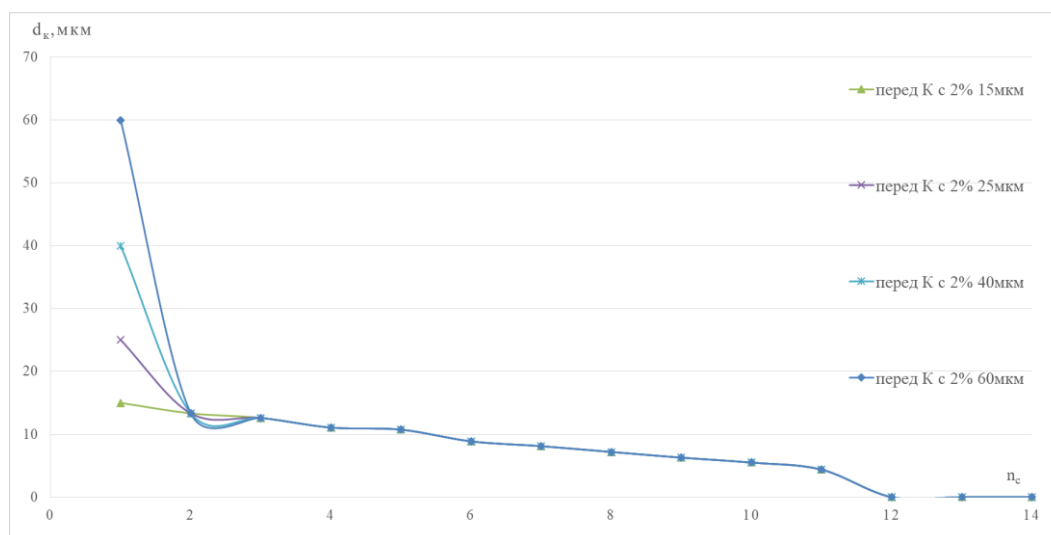


Рис. 7. Диаметры капель по ступеням при впрыске капель жидкости разного размера на входе компрессора.

ВЛИЯНИЕ ОСТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ КОМПРЕССОРА И ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТИ ПРИ ВПРЫСКЕ В ТРАКТ КОМПРЕССОРА

Далее в обобщенном виде рассмотрим влияние на выходные параметры компрессора некоторых других параметров, характеризующих или режимы его работы, или параметры впрыскиваемой жидкости. К их числу относятся влажность атмосферного воздуха перед компрессором φ , %, температура впрыскиваемой воды $T_{ж0}$, °К, температура воздуха перед компрессором T_0 , °К и число оборотов турбокомпрессора. Представленные в табл. 6 результаты расчетов относятся к сравнению с базовым вариантом с расходом 2%, диаметром капель 40 мкм и впрыском воды перед компрессором. Здесь варианты 1, 2 и 3 относятся к влиянию влажности атмосферного воздуха, варианты 1, 4 и 5 – к влиянию температуры жидкости, варианты 1, 6 и 7 – к влиянию температуры воздуха перед компрессором, варианты 1, 8 и 9 – к влиянию числа оборотов.

Влияние φ , % при ее изменении от 30 до 90% на параметры на выходе компрессора и затраты мощности в компрессоре не превышает 0,10 ... 0,15% и несущественно. Хотя при $\varphi = 90\%$ расход паровой фазы H_2O , поступающей из атмосферы, достигает почти 1% от расхода

воздуха, что сравнимо с расходом впрыска жидкости, влияние на параметры рабочего тела за компрессором обусловлено только различием теплофизических свойств сухого воздуха и водяного пара. А основное влияние на процесс «влажного сжатия» в компрессоре обусловлено самим процессом испарения с высокой теплотой испарения порядка 2000 кДж/кг.

Температура впрыскиваемой воды изменялась в расчетах в пределах 288,15 ... 488,15 °К, в последнем варианте при давлении воды более 23 МПа.

Приведенные в табл. 6 результаты показали, что влияние изменения этого параметра на процесс сжатия пренебрежимо мало. Дополнительно привнесенная энтальпия нагретой водой по сравнению с базовым вариантом $T_{ж0} = 288,15$ °К весьма незначительна.

Температура поступающего воздуха варьировалась в диапазоне $T_0 = 288,15 \dots 298,15$ °К. Данное изменение температуры ведет к уменьшению плотности и расхода поступающего воздуха, соответственно и расхода впрыскиваемой воды, составляющей 2%, что отразилось в повышении на 1,8% температуры за компрессором, в снижении на 5,7% давления за компрессором, в увеличении затрат мощности в компрессоре на 0,4%.

Также в числе варьируемых параметров было рассмотрено влияние числа оборотов турбокомпрессора на параметры, характеризующие «влажное сжатие» в компрессоре с его уменьшением от базового значения 7300 об/мин до 5840 об/мин и 3650 об/мин (варианты 8 и 9 в табл. 6). Снижение оборотов турбокомпрессора – это, конечно, прежде всего снижение расхода воздуха и затрат мощности в компрессоре. Так, снижение оборотов на 50% привело к снижению расхода воздуха до 42 кг/с, соответственно и 2% расхода впрыска воды – к снижению потребляемой мощности компрессора на 51%. При этом температура и давление за компрессором изменились не очень существенно. Однако моделирование сжатия в компрессоре по программе *CompressorWI* на данном этапе не предусматривало отборы воздуха за некоторыми ступенями, особенности регулирования по оборотам, поэтому это остается на перспективу.

Таблица 5

Некоторые параметры потока на выходе из компрессора при различных воздействиях на поток воздуха и параметры впрыска

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр капле d , мкм	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Расход впрыска воды ϕ	2% от расхода воздуха 0,3(30%)	2% от расхода воздуха 0,6(60%)	2% от расхода воздуха 0,9(90%)	2% от расхода воздуха 0,3(30%)	2% от расхода воздуха 0,3(30%)	2% от расхода воздуха 0,3(30%)	2% от расхода воздуха 0,3(30%)	2% от расхода воздуха 0,3(30%)	2% от расхода воздуха 0,3(30%)
$T_{ж0}$, °К	288,15	288,15	288,15	388,15	488,15	288,15	288,15	288,15	288,15
T_0 , °К	288,15	288,15	288,15	288,15	288,15	293,15	298,15	288,15	288,15
T_k , °К	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	5840	3650
P_k , Па	562,3	562,3	562,2	562,3	562,3	567,8	573,3	557,4	558,6
N_k , Вт	1139676	1138713	1137950	1139676	1139675	1106773	1074940	1178145	1223330
n_k , 1/с	1588300	1589301	1590338	1588300	1588299	1588489	1588831	1203456	777737
d_k , мкм	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$N_{к\text{СУМ}}$, Вт	0	0	0	0	0	0	0	0	0

СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ ДРУГИХ АВТОРОВ ПО СТЕНДОВЫМ ИСПЫТАНИЯМ

Выбор для проведения расчетов по программе *CompressorWI* именно 14-ступенчатого осевого компрессора двигателя АЛ-21Ф во многом определялся тем, что для него были проведены достаточно объемные стендовые испытания с впрыском различных расходов воды в компрессор, и при этом экспериментально выявлялось влияние этого фактора на его характеристики.

К их числу относятся опубликованные в работах [3 – 5] результаты экспериментов и расчетных оценок, выполненных авторами этих работ применительно к этому компрессору в его модернизированном варианте путем создания условий для впрыска воды с расходом до 2,5 % от расхода воздуха через компрессор. При стендовых испытаниях впрыск жидкости осуществлялся как на входе в компрессор, так и в различных сечениях в проточной части компрессора. Также можно отметить работы [6, 7], в которых анализировались результаты этих экспериментов.

Для сравнения с приведенными в данной работе результатами численных экспериментов по программе *CompressorWI* приведем некоторые характерные результаты и выводы по данным работ [3–5]:

- с ростом расхода впрыска воды происходит все большее снижение температуры потока за компрессором. Так, при впрыске 2,5% жидкости температура падает от 603,3°K (без впрыска) до 536,4 °K, т.е. на 11,09%;

- впрыск воды в тракт компрессора ведет к росту степени повышения давления π_k и расширению диапазона устойчивой работы компрессора. Так, при впрыске 2,5 % жидкости рост π_k оценивается примерно в 10%;

- также отмечено авторами работ существенное (на 6 % и более) повышение эффективного КПД компрессора $\eta_{эф}^*$ при впрыске до 2,5 % воды, который оценивался авторами по методике ЦИАМ им. П. И. Баранова для «влажного» сжатия, приведенной в этих работах;

- отмечено также слабое влияние на параметры компрессора подогрева воздуха на входе в компрессор до + 45...50 °С и температуры впрыскиваемой воды до 90 – 100°С;

- по сравнению с сжатием без впрыска «влажное» сжатие ведет к снижению степени повышения давления в первых ступенях и его повышению в последующих.

Как видно по данным табл. 2, при впрыске 2,5 % воды перед компрессором расчет по программе *CompressorWI* показывает снижение температуры за компрессором при «влажном сжатии» на 11,5 %, увеличение π_k на 6,3%, что хорошо согласуется с данными стендовых испытаний. Несколько большие значения для π_k в экспериментах объясняются тем, что в них для впрыска жидкости использованы пневматические форсунки с добавлением дополнительного расхода воздуха и большими начальными значениями π_k . Также по результатам расчетов, приведенным выше, было указано на незначительное влияние изменения температуры впрыскиваемой жидкости, как и в экспериментах.

Отдельного внимания заслуживает вопрос об определении эффективного КПД компрессора $\eta_{эф}^*$ при влажном сжатии. В работах [3, 5] представлена используемая при соответствующих испытаниях на стендах ЦИАМ им. П. И. Баранова формула для расчета эффективного КПД компрессора при «влажном» сжатии. Для сопоставления с данными испытаний компрессора двигателя АЛ-21Ф на основе расчетов по программе *CompressorWI* были определены значения $\eta_{эф}^*$ по той же методике. Результаты расчетов при впрыске различных расходов жидкости перед компрессором представлены в табл. 7.

Результаты сравнения подтверждают высокую степень соответствия расчетных по программе и экспериментальных значений КПД компрессора при «влажном» сжатии: так, для $\pi_k=11$ и расхода жидкости 2,5% в работе [3] приведено значение $\eta_{эф}^* = 0,915$, что практически совпадает с приведенным в табл. 7 значением КПД, равным 0,911. Также по результатам стендовых испытаний при впрыске 2,0 2,5% воды отмечается увеличение КПД компрессора по сравнению с «сухим» сжатием на 6,0% и более, что также согласуется с расчетными данными, приведенными в таблице.

В рассматриваемых работах [3–5] представлены также результаты испытаний при впрыске в различных ступенях компрессора, дается им качественное объяснение и формулируются рекомендации по оптимизации впрыска. Эти результаты также аналогичны приведенным выше результатам расчетов по программе *CompressorWI*.

Таблица 7

Влияние впрыска жидкости перед компрессором на его эффективный КПД

Расход впрыска воды	Без впрыска	0,5%	1%	1,5%	2%	2,5%	3%
$T_K, \text{ }^\circ\text{K}$	617,1	604,0	588,0	574,0	562,3	545,9	533,3
$G_{\text{вод}}, \text{ кг/с}$	0	0,43	0,86	1,29	1,72	2,15	2,58
$G_{\text{воз}}, \text{ кг/с}$	86	86	86	86	86	86	86
π_K	10,8	11,07	11,22	11,32	11,36	11,48	11,53
$\eta_{\text{эф}}^*$	0,842	0,862	0,876	0,888	0,898	0,911	0,921
Увеличение КПД, %	-	2,34%	4,84%	5,48%	6,58%	8,17%	9,34%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье на примере модельного для численных расчетов по программе *CompressorWI* [1] компрессора двигателя АЛ-21Ф выполнены исследования по влиянию различных условий и параметров, характеризующих режимы работы компрессора и впрыска воды, на процесс «влажного» сжатия, изменение параметров по ступеням, эффективный КПД компрессора $\eta_{\text{эф}}^*$ и параметры влажного воздуха на выходе компрессора и др. Показано на основе сравнения с данными стендовых испытаний этого компрессора, что расчетные данные по программе хорошо с ними согласуются. Это дает основания полагать, что программа может быть успешно применена и на этапе предварительных расчетов и проектирования компрессоров ГТД и ГТУ с впрыском воды в его тракт для улучшения их характеристик на некоторых режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакиров Ф. Г., Ма Ц., Бакиров Р. Ф., Ахтямова О. Ф. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023667694 «Программа для расчета компрессора с впрыском воды Compressor WI» от 17.08.2023 г. [Bakirov F.G., Ma J., Bakirov R.F., Akhtyamova O.F. State registration certificate of computer software No. 2023667694 “CompressorWI programme for calculation of compressor with water injection”, 08.17.2023 (in Russian).]
2. Бакиров Ф. Г., Ма Ц., Бакиров Р. Ф., Ахтямова О. Ф. Программа *CompressorWI* для расчета параметров компрессора с впрыском воды в его тракт// Вестник УГАТУ. 2023. №4 (102). С. 67-76. [Bakirov F.G., Ma J., Bakirov R.F., Akhtyamova O.F., CompressorWI software for calculating the parameters of a compressor with water injection into its path. Vestnik UGATU. 2023. No. 4 (102). P. 67-76 (in Russian).]
3. Середа 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.Sh., Muntyanov I.G. Experimental study of the effect of water injection into the inlet channel of a multistage axial compressor on its characteristics. Thermal Engineering. 2004. No. 5. P. 66-71 (in Russian).]
4. Середа С.О., Гельмедов Ф.Ш., Сачкова Н.Г. Расчётные 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. Thermal Engineering. 2004. No. 11. P. 60-65 (in Russian).]
5. Беляев В.Е., Середа 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. Май – июнь 2005. С. 16-20. [Belyaev V.E., Sereda S.O., Gel'medov F.Sh., Muntyanov I.G., Muntyanov G.L. Testing results of MES-60 compressor plant with water injection into the blading section. Gas Turbo Technology. May – June 2005. P. 16-20 (in Russian).]
6. Динь Тьен Зунг. Влияние впрыска воды в компрессор на характеристики газотурбинных энергетических установок: дис.... канд. техн. наук: 01.04.14 [Место защиты: МАИ]. М., 2013. 100 с. [Din Tien Zung. The effect of water injection into compressor on characteristics of gas turbine power plants: Cand. Sci. thesis: specialty 01.04.14. Moscow, 2013. 100 p. (in Russian).]
7. Скворцов А.В. Повышение параметров газотурбинных установок путём впрыска воды в проточную часть и оптимизации рабочего процесса в компрессоре: дис.... канд. техн. наук: 05.04.12 [Место защиты: С.-Петерб. политехн. ун-т]. СПб., 2010. 173 с. [Skvortsov A.V. Upgrading gas turbine plant parameters by injection of water into the blading section and optimization of the operation process in the compressor: Cand. Sci. thesis: specialty 05.04.12. Saint-Petersburg, 2010. 173 p. (in Russian).]

ОБ АВТОРАХ

МА Цзяжуй, аспирант УУНиТ. Иссл. в области авиационных двигателей и энергоустановок, моделирования рабочих процессов ГТД и разработки программ расчета, г. Уфа, Россия.

БАКИРОВ Федор Гайфуллович, д.т.н., профессор каф. АТиТ УУНИТ. Иссл. в области авиационных двигателей и энергоустановок, теплофизики процессов горения, теплотехники и теплоэнергетики, г. Уфа, Россия.

METADATA

Title: Analysis of different variants of water injection into GTE compressor path based on the CompressorWI programme.

Authors: Jiarui Ma¹, F.G. Bakirov²

Affiliation:

^{1,2}Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹jiarui2015@yandex.ru, ²fgbakirov@bk.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 28, no.1 (103), pp. 56-68, 2024. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The authors consider the influence of different variants of water injection into the axial vane compressor tract of a GTE or GTU, as well as mode parameters, on its stepwise evaporation and compressor parameters on the basis of numerical modelling using the CompressorWI programme developed by the authors in the Visual Studio 2022 environment. The results of the calculations are presented in tables and in a graphic form.

Key words: GTE compressor, liquid injection; parameter calculation programme; calculation results; tables and graphs; results analysis

About authors:

MA, Jiarui, MA, Jiarui, postgraduate student of UUST. Research in the field of aircraft engines and power plants, simulation of GTE work processes and development of calculation programs, Ufa, Russia.

BAKIROV, Fedor Gayfullovich, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Aviation Thermal Engineering and Thermal Power Engineering of UUST. Research in the field of aircraft engines and power plants, thermal physics of combustion processes, thermal engineering and thermal power engineering, Ufa, Russia.