

УДК 621.4, 536.71
Код ГРНТИ 55.42.47.61.42.32,55.42.45.61.43.32

doi 10.54708/19926502_2024_283105100

Программа Compressor WI-2S для расчета «влажного» сжатия в осевом компрессоре ГТД с впрыском воды в его тракт с учетом сепарации воды, перепуска или отбора рабочего тела

Ма Цзяжуй, Ф.Г. Бакиров*

Уфимский университет науки и технологий (УУНиТ), г. Уфа, Россия

Аннотация. Рассматриваются особенности и возможности разработанной авторами программы для расчета параметров осевого компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) или газотурбинной установки (ГТУ) при «влажном» сжатии с учетом сепарации воды на стенки корпуса, перепуска или отбора рабочего тела.

Ключевые слова: компрессор ГТД, впрыск жидкости; программа для расчета параметров; сепарация жидкости; перепуск и отбор рабочего тела; блок-схема расчета; формы таблиц.

*fgbakirov@bk.ru

Введение

В развитие разработанной авторами программы «CompressorWI» для расчета процессов сжатия в осевом компрессоре ГТД с подводом жидкости в его тракт при различных режимах его работы, вариантах и параметрах впрыска воды, приведенной в работе [1], была разработана и рассматривается более сложная программа, позволяющая моделировать эти процессы с учетом сепарации капель жидкости в начальных ступенях компрессора, возможности перепуска части рабочего тела между ступенями или его отбора. Соответственно изменены формулы расчетной модели, усложнены блок-схема и алгоритм расчета, формы исходной и итоговой таблиц программы. Вместе с тем неизменными остались выбранные интегрированная среда Visual Studio 2022 в 64-разрядной версии и язык программирования C# (C Sharp). Как было отмечено в работе [1], «важным моментом при выборе интегрированной среды и языка программирования при решении поставленной задачи была возможность поэтапного неоднократного расширения возможностей программы путем изменения, принятых в математической модели и методике расчета упрощающих допущений и тем самым усложнения программы», что и было реализовано в новой программе.

Цели и задачи программы CompressorWI-2S

Целями разработки существенно модернизированной и усложненной программы для расчета процессов «влажного» сжатия в осевом компрессоре с впрыском жидкости в его тракт являлось, с одной стороны, уточнение расчетов по сравнению с базовой программой CompressorWI [1] за счет учета сепарации жидкости на внутренние стенки корпуса компрессора с последующим ее испарением на них в пленочном режиме, с другой стороны – расширение возможностей программы для решения более сложных задач, которые представлены ниже. В то же время сохранялось назначение программы как не требующей больших объемов вычислительных процедур и памяти, обладающей быстродействием на персональных компьютерах.

Программа поддерживает решение следующих задач:

– поступенчатый расчет параметров рабочего тела в тракте осевого лопаточного компрессора ГТД или ГТУ с учетом наличия в нем водяного пара и воды, процессов капельного и пленочного испарения жидкости, а также с учетом сепарации жидкости на внутренние стенки корпуса компрессора в первых 3-х ступенях с последующим пленочным испарением;

– поверочный или проектировочный расчет осевого лопаточного компрессора при различных вариантах выбора места впрыска воды в тракт, параметрах воздуха на входе в компрессор с учетом его влажности и параметрах впрыскиваемой воды, включая ее температуру, давление и размеры капель, а также возможности организации перепуска рабочего тела между ступенями или отбора;

– расчет параметров рабочего тела на выходе компрессора и параметров самого компрессора при различных вариантах распределения работы по ступеням и КПД ступеней, перепуска рабочего тела между ступенями или отбора;

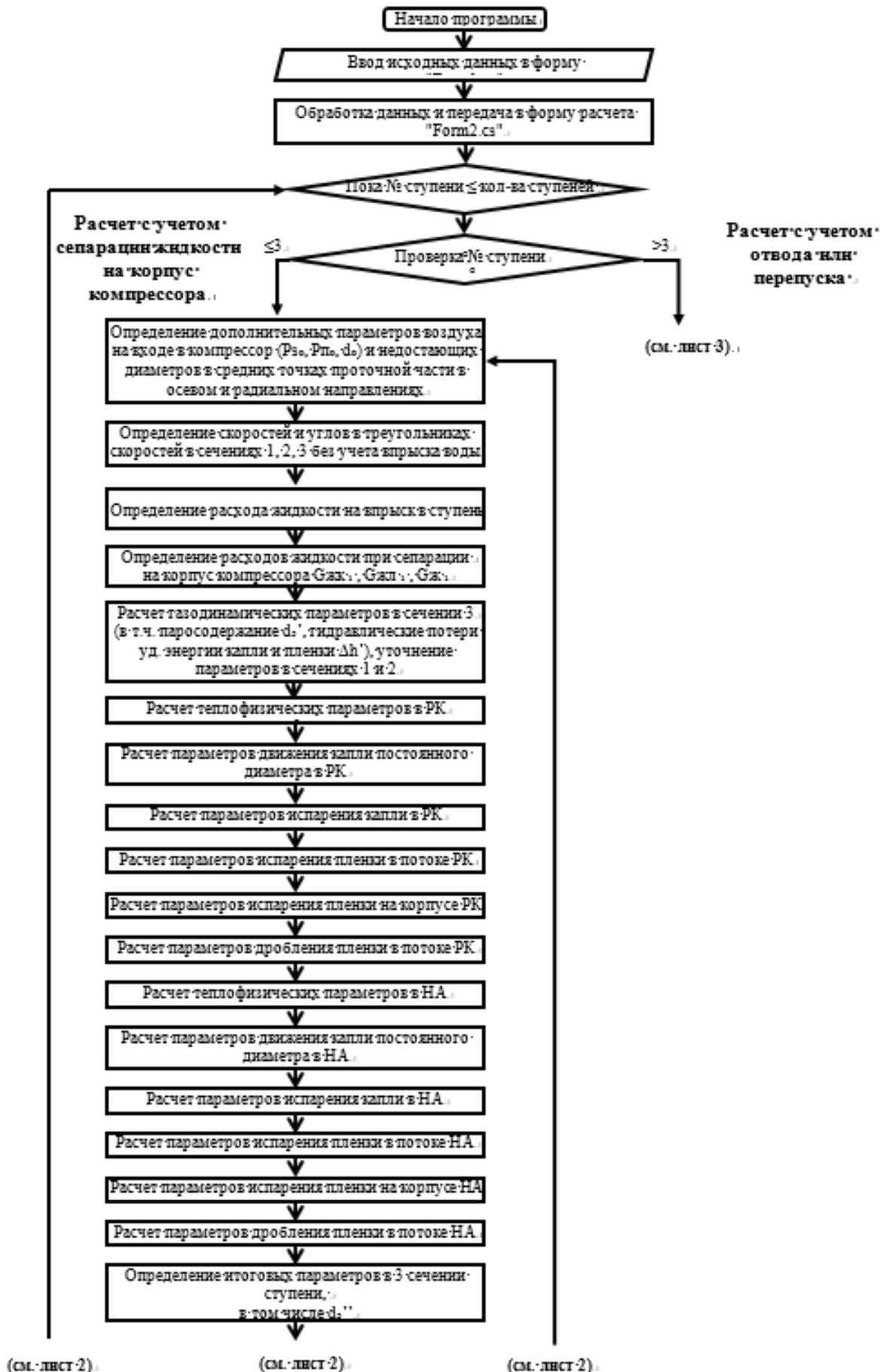
– оценка влияния поворота лопаток направляющего аппарата в заданной ступени компрессора на изменение параметров по тракту компрессора и в его выходном сечении при «влажном сжатии».

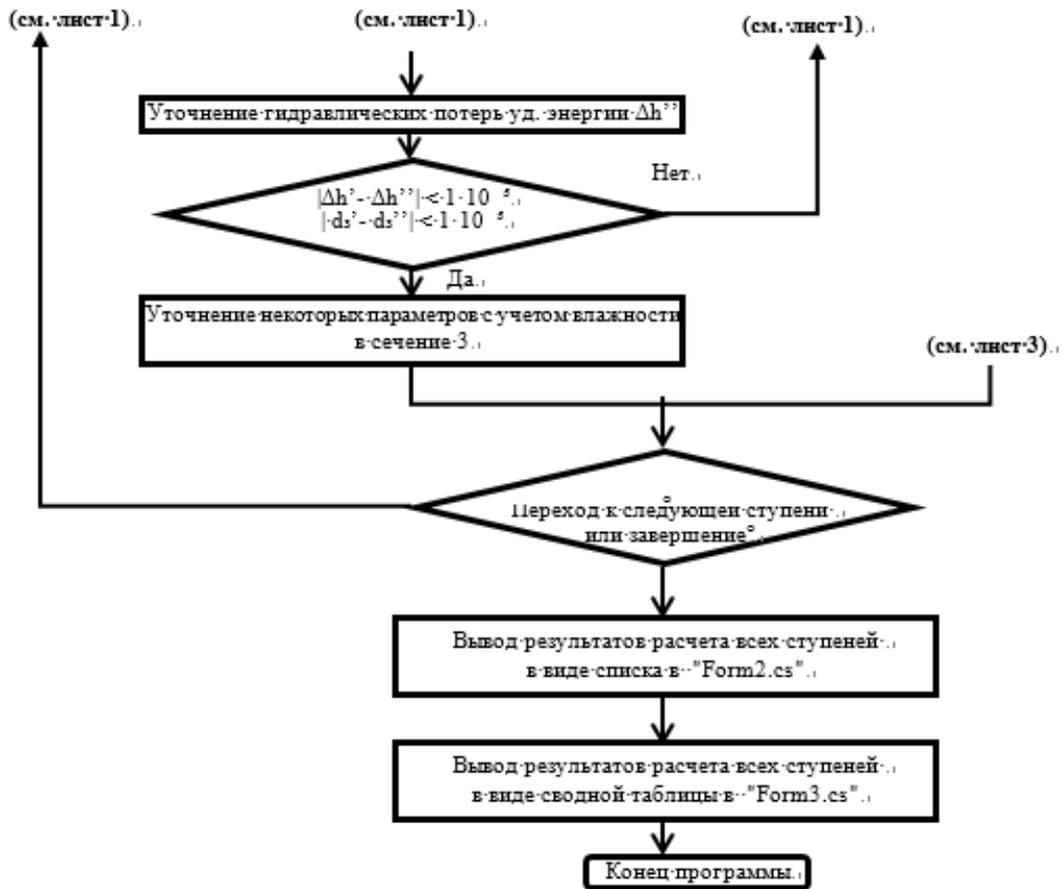
Выбор этого перечня задач определялся возможностью применения осевых лопаточных компрессоров в разных сферах: в авиационных ГТД, в том числе и для решения задач их конверсионного применения при создании наземных энергоустановок различного назначения, как правило, на основе двигателей, отработавших свой летный ресурс; в энергетических ГТУ различных модификаций и др. Блок-схема алгоритма программы представлена на Рис. 1.

Изменение и расширение перечня решаемых по программе задач соответственно привело к изменениям в таблице исходных данных для расчетов и в таблице результатов расчета для конкретного двигателя и варианта условий (см., например, табл. 1). В связи с тем, что таблицы результатов расчета весьма подробны и содержат для понимания особенностей процесса много промежуточных и дополнительных данных, и поэтому содержат более 100 строк, в данной статье приводятся сокращенные таблицы с основными параметрами по ступеням и всему компрессору. Что касается исходных данных, то в дополнение к форме таблицы, приведенной в работе [1], для расчетов процесса «влажного» сжатия с учетом сепарации на корпус компрессора приводятся необходимые геометрические данные о его размерах для рабочего колеса и направляющего аппарата каждой ступени, а также количества сепарируемой жидкости на стенки корпуса в рабочих колесах первых трех ступеней в долях от расхода впрыска жидкости на входе в компрессор. Для расчета вариантов перепуска жидкости от ступеней с большим давлением в направлении ступеней с меньшим давлением, а также вариантов безвозвратного отбора части потока в одной из ступеней компрессора, начиная с четвертой, в таблице исходных данных дополняется информация о номерах ступеней, в которых осуществляется отбор или подвод части рабочего тела, и расходе отбираемого потока в долях от расхода основного потока. Расчеты с отбором или перепуском могут выполняться одновременно с учетом сепарации на первых 3-х ступенях при наличии впрыска жидкости на входе компрессора с возможным впрыском жидкости также и по тракту компрессора, начиная с 4-й ступени.

В таблице исходных данных исключены, в отличие от работы [1], значения теплотемкостей пара, задаваемые ранее поступенчато, так как в программе CompressorWI-2S предусмотрен учет зависимости этого параметра от текущих значений температуры и давления, изменяющихся по тракту компрессора.

В данной статье рассматриваются примеры использования разработанной программы для оценки влияния сепарации жидкости под действием центробежных сил на внутренние стенки компрессора, а примеры других задач будут представлены в последующих работах. Ограничение учета сепарации на корпус первыми 3-мя ступенями было выбрано на основе исследований других авторов, в том числе работ [2, 3].





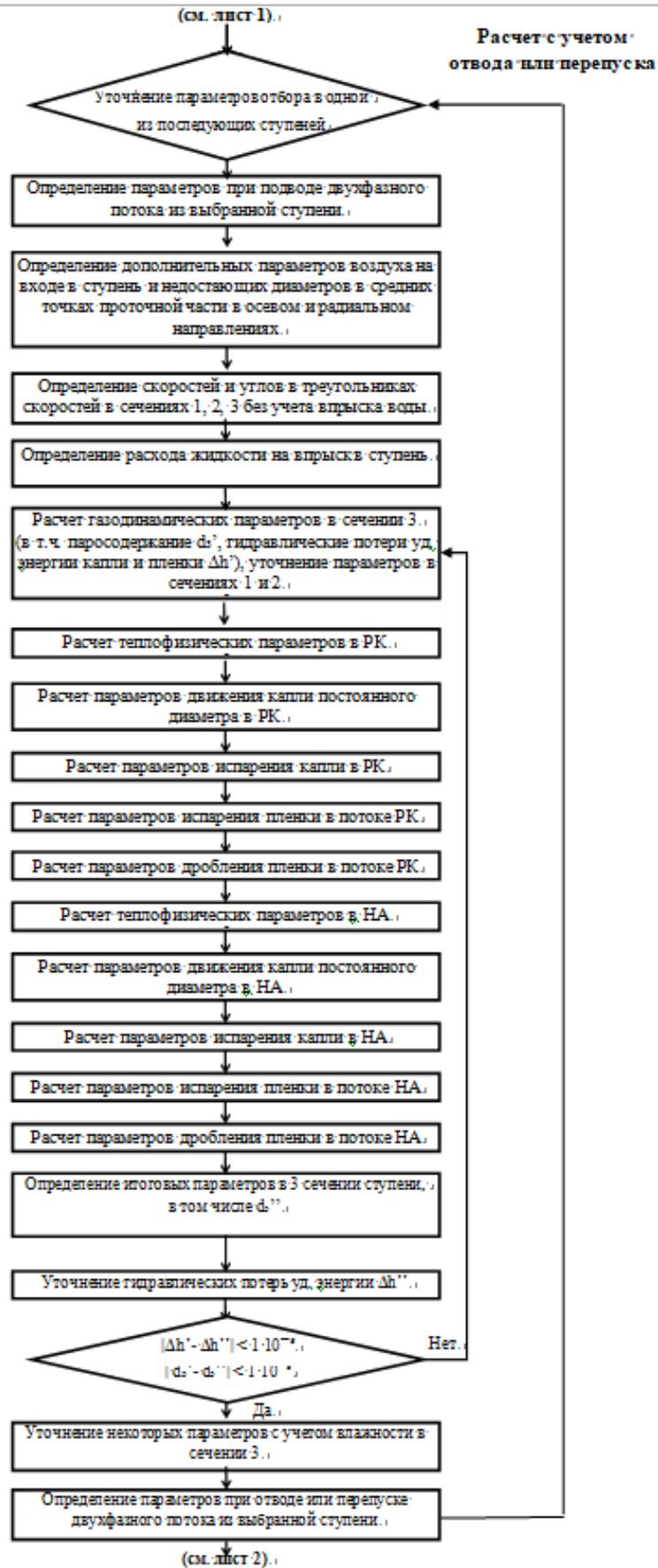


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма программы CompressorWI-2S.

Таблица 1. Параметры по ступеням компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 при впрыске 2% расхода воды в тракт компрессора без учета сепарации.

Обозначение параметра	Наименование параметра	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	...	Ступень 13	Ступень 14	Параметры на выходе из К
φ_1	Относительная влажность воздуха перед ступенью	0,3000	0,1053	0,0653	...	0,0076	0,0062	0,0062
T_1^* , К	Температура торможения потока перед ступенью	288,15	303,7	319,1	...	530,6	549,6	
T_3^* , К	Температура торможения потока на выходе из ступени	303,7	319,1	335,0	...	549,6	566,7	566,7
P_1^* , Па	Давление торможения потока перед ступенью	100311,7	116278,9	135087,1	...	881547,1	975523,1	
P_3^* , Па	Давление торможения потока на выходе из ступени	116278,9	135087,1	157132,5	...	1033864,1	1130829,3	1130829,3
$\pi_{ст}^*$	Степень повышения давления в ступени	1,148	1,162	1,163	...	1,109	1,094	
$\Pi \pi_{ст}^*$	Общая степень повышения давления на выходе из ступени	1,147	1,333	1,362	...	10,203	11,160	11,160
$G_{в1}$, кг/с	Расход воздуха перед ступенью	86,0	86,0	86,0	...	86	86	86,0
$G_{ж1впр}$, кг/с	Расход жидкости при впрыске перед ступенью	1,720	0	0	...	0	0	0

$G_{ж3},$ кг/с	Расход жидкости за ступенью с учетом испарения в предыдущих ступенях	1,711	1,676	1,631	...	0	0	0
$G_{п1},$ кг/с	Расход пара перед ступенью	0,072	0,084	0,116	...	1,792	1,792	
$G_{пв1},$ кг/с	Расход паровоздушной смеси перед ступенью	86,072	86,084	86,116	...	87,792	87,792	87,792
$G_1,$ кг/с	Общий расход двухфазной смеси перед ступенью	87,792	87,792	87,792	...	87,792	87,792	87,792
$G_3,$ кг/с	Общий расход двухфазной смеси на выходе из ступени	87,792	87,792	87,792	...	87,792	87,792	87,792
$d_k,$ м	Диаметр капель жидкости перед ступенью	4,00E-05	1,33E-05	1,26E-05	...	0	0	0
$n_k,$ 1/с	Секундный расход капель жидкости перед ступенью	51327469147	1,37E+12	1,61E+12	...	0	0	0
$d_1,$ кг/кг	Массовое влагосодержание паровоздушной смеси перед ступенью	0,000845	0,000982	0,00136	...	0,020845	0,020845	
$l_{ст},$ Дж/кг г	Удельная работа ступени	16100	17150	18100	...	20150	18100	336650
$N_{ст},$ Вт	Мощность, затраченная на сжатие потока в ступени	1385864,9	1476627,3	1559117,5	...	1769022,3	1589047,3	29279980

Таблица 2. Параметры по ступеням компрессора ГТД АЛ-21Ф-3 при впрыске 2% расхода воды в тракт компрессора с учетом сепарации.

Обозначение параметра	Наименование параметра	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	...	Ступень 13	Ступень 14	Параметры на выходе из К
φ_1	Относительная влажность воздуха перед ступенью	0,3000	0,1005	0,0538	...	0,0075	0,0062	0,0062
T_1^* , К	Температура торможения потока перед ступенью	288,15	303,9	320,1	...	531,8	550,9	
T_3^* , К	Температура торможения потока на выходе из ступени	303,9	320,1	337,0	...	550,9	567,9	567,9
P_1^* , Па	Давление торможения потока перед ступенью	100311,7	116499,5	135968,2	...	936851,4	1038437,5	
P_3^* , Па	Давление торможения потока на выходе из ступени	116499,5	135968,2	158834,3	...	1038437,5	1135603,7	1132525,9
$\pi_{ст}^*$	Степень повышения давления в ступени	1,150	1,167	1,168	...	1,108	1,094	
$\Pi_{\pi_{ст}^*}$	Общая степень повышения давления на выходе из ступени	1,150	1,342	1,568	...	10,249	11,208	11,208
$G_{в1}$, кг/с	Расход воздуха перед ступенью	86	86	86	...	86	86	86,0
$G_{ж1вп}$, ρ , кг/с	Расход жидкости при впрыске перед ступенью	1,72	0	0	...	0	0	0
$G_{ж3}$, кг/с	Расход жидкости за ступенью с учетом испарения в предыдущих ступенях	1,711	1,690	1,658	...	0	0	0

$G_{п1}$, кг/с	Расход пара перед ступенью	0,072	0,082	0,103	...	1,792	1,792	1,792
$G_{пв1}$, кг/с	Расход паровоздушной смеси перед ступенью	86,072	86,082	86,103	...	87,792	87,792	87,792
G_1 , кг/с	Общий расход двухфазной смеси перед ступенью	87,792	87,792	87,792	...	87,792	87,792	87,792
G_3 , кг/с	Общий расход двухфазной смеси на выходе из ступени	87,792	87,792	87,792	...	87,792	87,792	87,792
d_k , м	Диаметр капель жидкости перед ступенью	4,00E-05	1,26E-05	1,14E-05	...	0	0	0
n_k , 1/с	Секундный расход капель жидкости перед ступенью	30796481 488	6,45E+11	7,41E+11	...	0	0	0
d_1 , кг/кг	Массовое влагосодержан ие паровоздушной смеси перед ступенью	0,000845	0,000952	0,001196	...	0,020845	0,020845	
$l_{ст}$, Дж/кг г	Удельная работа ступени	16100	17150	18100	...	20150	18100	336650
$N_{ст}$, Вт	Мощность, затраченная на сжатие потока в ступени	1385844,0	1476484,1	1558745,6	...	1769022,3	1589047,3	29278987,3

Оценка влияния сепарации жидкости на стенки корпуса компрессора

Как отмечено выше, в математической модели предусмотрено выполнение расчетов по оценке влияния сепарации впрыснутой на входе компрессора жидкости на процесс «влажного» сжатия в первых 3-х ступенях компрессора. Как правило, в последующих ступенях с повышением давления «несущая» способность потока возрастает и сепарация жидкости на стенки корпуса незначительна. Поэтому расчеты с учетом сепарации были выполнены только для варианта с впрыском воды перед компрессором. Очевидно, что в расчетной модели программы сепарация осуществляется в рабочем колесе ступеней, а пленочное испарение этой части жидкости происходит на стенках корпуса компрессора как в рабочем колесе, так и в направляющем аппарате. При этом для рабочего колеса определяющей в критериальных уравнениях принимается окружная составляющая скорости потока у стенки.

Рассмотрим результаты моделирования в программе CompressorWI-2S «влажного» сжатия в осевых компрессорах на примере авиационного ГТД АЛ-21Ф-3 и энергетической уста-

новки ГТЭ-160, имеющих достаточно близкие значения степени повышения давления π_k , но отличающиеся существенно по величине расхода воздуха. Заданные доли расходов на сепарацию жидкости ε_c принимались равными 0,4 для 1-й ступени, 0,2 для 2-й ступени и 0,05 для 3-й ступени. Таким образом, суммарно они достигали 65 % от расхода жидкости при впрыске. В целом это значительно сокращает долю жидкости, испаряющуюся в основном потоке в виде капельной жидкости в межлопаточных каналах рабочего колеса и направляющего аппарата и в пленочном режиме на поверхностях их лопаток. Вместе с тем, как было показано ранее в работе [2] при моделировании «влажного» сжатия в компрессоре авиационного ГТД АЛ-21Ф-3, в первых ступенях вследствие низкой температуры воздуха испарение жидкости весьма незначительное.

Результаты моделирования с учетом сепарации приведены в таблице 2 для ГТД АЛ-21Ф-3, а в таблицах 3 и 4 – для ГТЭ-160 без учета и с учетом сепарации соответственно. Они позволяют сделать следующие выводы:

1. Сепарация жидкости на стенки компрессора в первых 3-х ступенях замедляет ее испарение, в частности, для ГТД АЛ-21Ф-3 на 1,7 %, а для ГТУ ГТЭ-160 со значительно большим расходом воздуха – на 10,8 % по сравнению с расчетом без учета сепарации. Как видно, степень влияния сепарации сильно зависит от масштабного фактора, что подтверждается и тем, что полное испарение впрыснутой жидкости с расходом 2 % от расхода воздуха завершается для ГТД АЛ-21Ф-3 в 10-й ступени компрессора, а для ГТЭ-160 – уже в 8-й ступени. Более интенсивное испарение жидкости и завершение полного ее испарения в 8-й ступени для ГТУ определяется большими ее габаритами и соответственно размера межлопаточного пространства в ступенях, что усиливает роль капельного испарения жидкости. Само замедление процесса испарения жидкости при сепарации ее на стенки компрессора и объясняется тем, что меньшая доля жидкости испаряется в капельном режиме в межлопаточных каналах.

2. Менее значимое в процентном отношении влияние сепарации проявляется также на полное давление и температуру потока за компрессором ГТД АЛ-21Ф-3 по сравнению с ГТУ ГТЭ-160, для которой эти изменения составляют порядка 2 %.

3. Более противоречивый результат получен по общим затратам мощности на привод компрессора с учетом сепарации N_k : для ГТД АЛ-21Ф-3 они выросли на 1,7 %, а в случае ГТУ ГТЭ-160 – уменьшились на 0,2 %.

4. Для приведенных расчетов начальный диаметр капель впрыскиваемой жидкости для компрессоров обоих двигателей принимался равным 40 мкм. Как было показано в работах авторов [4,5], уже после первой ступени компрессора диаметр срываемых с кромок лопаток капель быстро падает до значений, определяемых газодинамическими условиями в потоке. Расчеты показали, что учет сепарации приводит лишь к незначительному изменению этого параметра, а сами диаметры капель находятся в диапазоне 12–15 мкм и незначительно отличаются для рассматриваемых двигателей. Это нашло подтверждение и при дополнительных расчетах для ГТУ ГТЭ-160, связанных с изменением диаметра впрыскиваемых капель от 3 мкм до 60 мкм (см. Рис. 2).

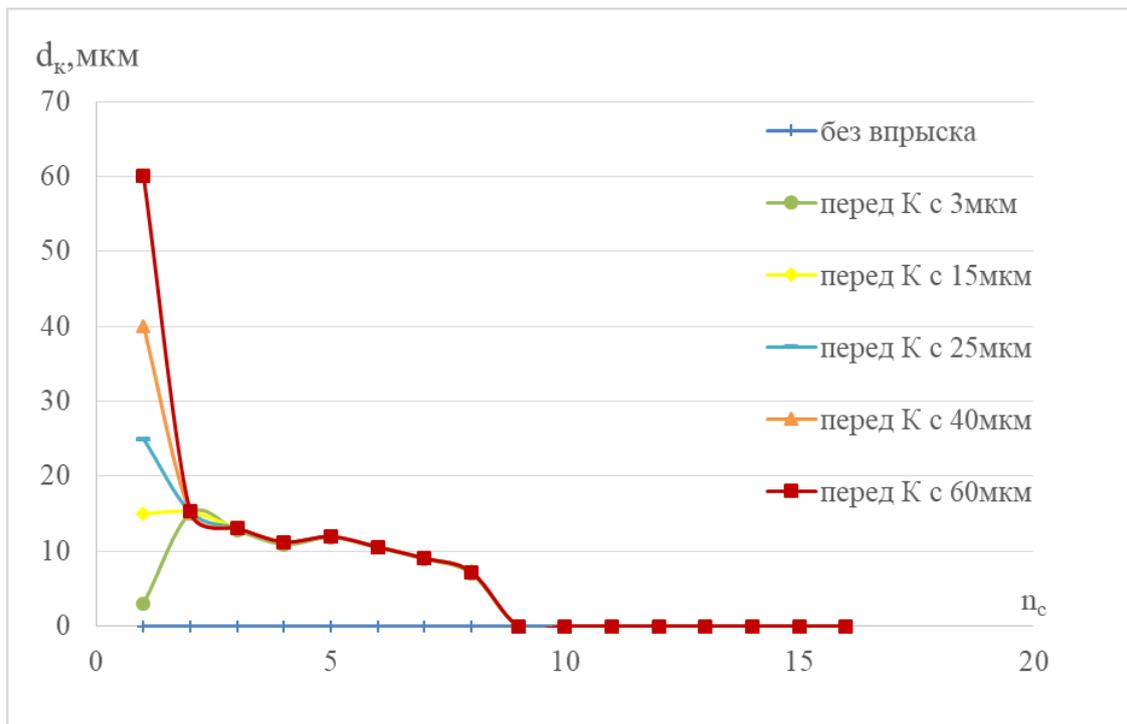


Рисунок 2. Изменение диаметров капель по ступеням при впрыске жидкости на входе компрессора ГТЭ-160.

Таблица 3. Параметры по ступеням компрессора ГТУ ГТЭ-160 при впрыске 2% расхода воды в тракт компрессора без учета сепарации.

Обозначение параметра	Наименование параметра	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	...	Ступень 15	Ступень 16	Параметры на выходе из К
φ_1	Относительная влажность воздуха перед ступенью	0,3000	0,0860	0,1107	...	0,0092	0,0076	0,0076
T_1^* , К	Температура торможения потока перед ступенью	288,15	302,7	313,5	...	519,2	536,7	
T_3^* , К	Температура торможения потока на выходе из ступени	302,7	313,5	323,5	...	536,7	553,5	553,5
P_1^* , Па	Давление торможения потока перед ступенью	100311,8	116435,7	135303,4	...	1036366,6	1145915,8	
P_3^* , Па	Давление торможения потока на выходе из ступени	116435,7	135303,4	158134,9	...	1145915,8	1257317,6	1257317,6

Продолжение табл. 3

$\pi_{ст}^*$	Степень повышения давления в ступени	1,149	1,162	1,169	...	1,106	1,097	
$\Pi_{ст}^*$	Общая степень повышения давления на выходе из ступени	1,149	1,335	1,561	...	11,309	12,409	12,409
$G_{в1},$ кг/с	Расход воздуха перед ступенью	502,5	502,5	502,5	...	502,5	502,5	502,5
$G_{ж1в}$ пр, кг/с	Расход жидкости при впрыске перед ступенью	10,05	0	0	...	0	0	0
$G_{ж3},$ кг/с	Расход жидкости за ступенью с учетом испарения в предыдущих ступенях	9,665	8,830	7,690	...	0	0	0
$G_{п1},$ кг/с	Расход пара перед ступенью	0,425	0,809	1,645	...	10,475	10,475	
$G_{пв1},$ кг/с	Расход паровоздушной смеси перед ступенью	502,925	503,309	504,145	...	512,975	512,975	512,975
$G_1,$ кг/с	Общий расход двухфазной смеси перед ступенью	512,975	512,975	512,975	...	512,975	512,975	512,975
$G_3,$ кг/с	Общий расход двухфазной смеси на выходе из ступени	512,975	512,975	512,975	...	512,975	512,975	512,975
$d_k,$ м	Диаметр капель жидкости перед ступенью	4,00E-05	1,62E-05	1,46E-05	...	0	0	0
$n_k,$ 1/с	Секундный расход капель жидкости перед ступенью	2,99E+11	4,33E+12	5,41E+12	...	0	0	0
$d_1,$ кг/кг	Массовое влагосодержание паровоздушной смеси перед ступенью	0,000845	0,001611	0,003273	...	0,020845	0,020845	

$I_{ст},$ Дж/ кг	Удельная работа ступени	16000	16500	17000	...	18500	17852	328352
$N_{ст},$ Вт	Мощность, затраченная на сжатие потока в ступени	1385864, 9	1476627, 3	1559117, 5	...	1769022,3	1589047,3	16763677 7

Таблица 4. Параметры по ступеням компрессора ГТУ ГТЭ-160 при впрыске 2% расхода воды в тракт компрессора с учетом сепарации жидкости на корпус компрессора.

Обозначение параметра	Наименование параметра	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	...	Ступень 15	Ступень 16	Параметры на выходе из К
φ_1	Относительная влажность воздуха перед ступенью	0,3000	0,0751	0,0740	...	0,0092	0,0076	0,0076
$T_1^*,$ К	Температура торможения потока перед ступенью	288,15	303,3	316,5	...	521,5	539,0	
$T_3^*,$ К	Температура торможения потока на выходе из ступени	303,3	316,5	329,7	...	539,0	555,8	555,8
$P_1^*,$ Па	Давление торможения потока перед ступенью	100311,8	117117,0	137400,2	...	1044787,4	1154728,0	
$P_3^*,$ Па	Давление торможения потока на выходе из ступени	117117,0	137400,2	161995,4	...	1154728,0	1266498,5	1266498,5
$\pi_{ст}^*$	Степень повышения давления в ступени	1,156	1,173	1,179	...	1,105	1,097	
$\Pi \pi_{ст}^*$	Общая степень повышения давления на выходе из ступени	1,156	1,356	1,599	...	11,396	12,499	12,499
$G_{в1},$ кг/с	Расход воздуха перед ступенью	502,5	502,5	502,5	...	502,5	502,5	502,5
$G_{ж1впр},$ кг/с	Расход жидкости при впрыске перед ступенью	10,05	0	0	...	0	0	0

Окончание табл. 4

$G_{жз}$, кг/с	Расход жидкости за ступенью с учетом испарения в предыдущих ступенях	9,746	9,203	8,522	...	0	0	0
$G_{п1}$, кг/с	Расход пара перед ступенью	0,425	0,728	1,272	...	10,475	10,475	
$G_{пв1}$, кг/с	Расход паровоздушной смеси перед ступенью	502,925	503,228	503,772	...	512,975	512,975	512,975
G_1 , кг/с	Общий расход двухфазной смеси перед ступенью	512,975	512,975	512,975	...	512,975	512,975	512,975
G_3 , кг/с	Общий расход двухфазной смеси на выходе из ступени	512,975	512,975	512,975	...	512,975	512,975	512,975
d_k , м	Диаметр капель жидкости перед ступенью	4,00E-05	1,53E-05	1,31E-05	...	0	0	0
n_k , 1/с	Секундный расход капель жидкости перед ступенью	1,79E+11	2,02E+12	2,36E+12	...	0	0	0
d_1 , кг/кг	Массовое влагосодержание паровоздушной смеси перед ступенью	0,000845	0,001449	0,002531	...	0,020845	0,020845	
$l_{ст}$, Дж/кг	Удельная работа ступени	16000	16500	17000	...	18500	17852	328352
$N_{ст}$, Вт	Мощность, затраченная на сжатие потока в ступени	8049222	8307751,1	8569910,1	...	9490030,3	9157622,7	16760092 2

Заключение

Рассматриваются особенности и возможности разработанной авторами программы CompressorWI-2S в интегрированной среде Visual Studio 2022 и на языке программирования C# (C Sharp) для быстрых расчетов на персональных компьютерах процессов «влажного» сжатия в осевых компрессорах ГТД и ГТУ, которая в развитие предыдущей версии позволяет производить поступенчатое моделирование компрессора и определять его параметры на выходе при различных вариациях и условиях впрыска жидкости в тракт с учетом ее сепарации на стенки корпуса в начальных ступенях, возможного перепуска части рабочего тела между ступенями или же его отбора [6]. В рамках данной статьи приведены и проанализированы результаты расчетов по программе для варианта впрыска воды на входе компрессоров с учетом сепарации на стенки корпуса на примере авиационного ГТД АЛ-21Ф-3 и энергетической

установки ГТЭ-160, которые подтвердили эффективность программы в широком диапазоне изменения расходов сжимаемого воздуха и относительной доли впрыска жидкости. Проведена оценка влияния учета сепарации жидкости в начальных ступенях компрессора на изменение его расчетных параметров.

Литература:

1. Бакиров Ф. Г., Ц. Ма, Бакиров Р. Ф., Ахтямова О. Ф. Программа CompressorWI для расчета параметров компрессора с впрыском воды в его тракт. Вестник УГАТУ, 2023, т. 27, № 4(102). С. 67–76 [F.G. Bakirov, J. Ma, R.F. Bakirov, O. F. Akhtyamova, CompressorWI software for calculating the parameters of a compressor with water injection into its path. Vestnik UGATU, 2023, Vol. 27, No. 4(102). P. 67-76 (in Russian)].
2. Скворцов А. В. Повышение параметров газотурбинных установок путем впрыска воды в проточную часть и оптимизации рабочего процесса в компрессоре: дис. кандидата технических наук: 05.04.12; [Место защиты: С.-Петерб. политехн. ун-т]. - Санкт-Петербург, 2010. – 173 с. [A.V. Skvortsov, Improving the parameters of gas turbine installations by injecting water into the flow part and optimizing the workflow in the compressor: Cand.Sci. thesis. - St. Petersburg, 2010. – 173 p. (in Russian)].
3. Беркович А. Л. Впрыск воды в компрессор ГТУ/А. Л. Беркович, В. Г. Полищук, В. А. Рассохин; под ред. А. Л. Берковича. - СПб. Изд-во Политехн. ун-та. 2010. – 151 с. [A.L. Berkovich, V.G. Polishchuk, V.A. Rassokhin, Water injection into the GTU compressor; edited by A.L. Berkovich. - St. Petersburg. Publishing House of the Polytechnic University. 2010. – 151 p. (in Russian)].
4. 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 [Jiarui Ma, F.G. Bakirov, 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)].
5. Ma Jiarui, Bakirov Fedor Gayfullovich. Effectiveness analysis of water injection into the GTD compressor duct in its various stages. Journal of Electrical Systems. Vol. 20, № 5s (2024). – P. 1281–1285.
6. 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 CompressorWI-2S». 12.08.2024. РОСПАТЕНТ, Москва, 2024. [F.G. Bakirov, Jiarui Ma, R.F. Bakirov, O.F. Akhtyamova, Certificate of state registration of the computer program No. 2024668838 “CompressorWI-2S program for calculating a compressor with water injection, taking into account separation and bypass between stages”. 12.08.2024. ROSPATENT, Moscow, 2024 (in Russian)].

Об авторах:

МА Цзяжуй, аспирант УУНиТ. Иссл. в области авиационных двигателей и энергоустановок, моделирования рабочих процессов ГТД и разработки программ расчета, 89874856608.

БАКИРОВ Федор Гайфуллович, д.т.н., профессор каф. АТиТ УУНиТ. Иссл. в области авиационных двигателей и энергоустановок, теплофизики процессов горения, теплотехники и теплоэнергетики, 89273037490; fgbakirov@bk.ru.

Metadata:

Title: 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.

Author 1: Jiarui Ma, postgrad. student (UUST). Research in the field of aircraft engines and power plants, modeling of gas turbine engine work processes and development of calculation programs.

Author 2: Fedor Gayfullovich Bakirov, Dr. of Tech. Sci., Prof. at the Dept. of Aviation Thermal Engineering and Heat Power Engineering (UUST). Research in the field of aircraft engines and

power plants, thermophysics of combustion processes, heat engineering and thermal power engineering, fgbakirov@bk.ru, ORCID ID:26150568, Web of Science ResearcherID: 26150568, Scopus Author ID: 26150568.

Abstract: The paper considers the features and capabilities of the program, developed by the authors, for calculating the parameters of the axial compressor of a gas turbine engine or a gas turbine plant during “wet” compression, taking into account water separation onto the body walls, bypass or extraction of the working medium.

Keywords: GTE compressor; liquid injection; parameter calculation program; liquid separation; calculation block diagram; table forms.