

УДК 621.4, 536.71

## ПРОГРАММА COMPRESSORWI для РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОМПРЕССОРА С ВПРЫСКОМ ВОДЫ В ЕГО ТРАКТ

Ф.Г. БАКИРОВ<sup>1</sup>, Ц. МА<sup>2</sup>, Р.Ф. БАКИРОВ<sup>3</sup>, О.Ф. АХТЯМОВА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>fgbakirov@bk.ru, <sup>2</sup>jarui2015@yandex.ru, <sup>3</sup>bakirov.ruslan@mail.ru, <sup>4</sup>foresight.OF@yandex.ru

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Россия.

<sup>3</sup> ООО «Петроинжиниринг», г. Уфа, Россия

<sup>4</sup> ООО «Югранефтегазпроект», г. Уфа, Россия

*Поступила в редакцию 16.11.2023*

**Аннотация.** Рассматриваются особенности и возможности разработанной авторами программы для расчета параметров компрессора при различных вариантах впрыска жидкости (воды) в тракт осевого лопаточного компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) или газотурбинной установки (ГТУ) в среде Visual Studio 2022 в 64-разрядной версии на языке программирования C# (C Sharp).

**Ключевые слова:** компрессор ГТД; впрыск жидкости; программа для расчета параметров; среда и язык программирования; блок-схема расчета; формы таблиц

### ВВЕДЕНИЕ

Значительный интерес к исследованиям процессов сжатия воздуха в компрессоре с впрыском воды в тракт как в нашей стране, так и за рубежом, включающим как экспериментальные исследования и испытания, так и моделирование и расчетные исследования с применением информационных технологий, объясняется тем, что впрыск сравнительно небольших расходов воды рассматривается как эффективный способ охлаждения воздуха в процессе сжатия за счет испарения впрыснутой воды и тем самым снижения удельной работы сжатия и потребляемой мощности. Это соответственно отражается и на характеристиках двигателя в целом. Наиболее распространенным является такой способ в сфере применения энергетических ГТУ. На этапе проектирования авиационных ГТД это важно для оценки возможного влияния попадания в тракт двигателя значимых количеств воды при прохождении через грозовой фронт или при быстром заборе воды из водоема на специальных самолетах для пожаротушения. Аналогичные ситуации могут возникать и в судовых ГТУ, и в танковых энергоустановках.

Анализ научно-технической литературы свидетельствует о наличии в опубликованных отечественных и зарубежных работах результатов как экспериментальных исследований и испытаний, так и теоретических исследований и моделирования в программных продуктах. Значительная часть этих исследований и публикаций относится к периоду после начала 2000-х годов. Стендовые испытания такого рода весьма энергозатратны и требуют значительного финансирования. Поэтому весьма актуальны именно разработки специализированных программных продуктов в различных средах применительно к этой задаче. Для универсальных программ характерно, что разработчики не дают возможности более углубленного исследования таких сложных процессов с возможностью их дальнейшей корректировки с учетом развития техники и технологий и их моделирования.

Поэтому в рамках исследований авторами была поставлена задача разработки и тестовой отработки отдельной программы для расчета лопаточных компрессоров ГТД и ГТУ с учетом

впрыска жидкости в его тракт. Это и являлось целью настоящей работы, важной как для научных исследований, так и учебного процесса.

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА СЖАТИЯ В ЛОПАТОЧНОМ КОМПРЕССОРЕ ГТД И ГТУ С ВПРЫСКОМ ВОДЫ В ТРАКТ**

Реальные физические процессы, протекающие в тракте компрессора при впрыске воды, конечно, весьма сложные и многофакторные, поэтому задача их математического моделирования, как правило, достижима лишь в некотором приближении на основе принимаемых допущений. Рассмотрим эти процессы.

В их число входит сепарация капель на начальных ступенях компрессора на стенки корпуса с последующим испарением, трехмерное движение капель в межлопаточных каналах с испарением, образование пленки воды на поверхностях лопаток с их испарением, дробление этих пленок на капли при истечении с выходных кромок лопаток, ограничение испарения жидкости в рамках ступени компрессора в зависимости от достигнутого уровня температуры и давления по величине и гидравлические сопротивления с дополнительными энергозатратами для капель и пленки при контакте с поверхностями рабочих и сопловых лопаток и корпуса и др.

Также многовариантны условия впрыска жидкости по месту ее подвода, конструктивному исполнению организации впрыска, по давлению, температуре и размерам капель впрыскиваемой жидкости (воды). Сложности для моделирования добавляет и тот фактор, что ряд ступеней может работать в отсутствие впрыска воды или после завершения испарения, а ряд ступеней со всеми процессами, сопутствующими впрыску и испарению жидкости. И все эти совокупности процессов и факторов реализуются в самых различных конфигурациях и конструкциях ГТД и ГТУ и их компрессоров на различных режимных параметрах их работы. Поэтому значимость эффективных математических моделей и соответствующих компьютерных программ весьма значительна, особенно на этапе эскизного проектирования компрессоров и двигателей. Очень важное значение для проверки адекватности моделей имеют данные экспериментов и испытаний реальных компрессоров при впрыске жидкости в тракт.

Разработанные ранее программы расчета представляют собой ноу-хау авторов и предприятий разработчиков и не имеются в открытом доступе, а в докладах и публикациях авторов предоставляются в основном результаты расчетов, иногда блок-схемы алгоритмов. Несколько более расширенную информацию дают только диссертационные работы в полнотекстовом формате. Применительно к рассматриваемой научно-технической задаче таковыми являются работы [1,2]. В них на основе принятых допущений рассмотрены разные подходы и уровни учета реальных факторов и процессов при разработке математических моделей и компьютерных программ.

В работе [1], отражающей исследования и разработки по рассматриваемой тематике, выполненные в Московском авиационном институте (МАИ), на основе многих более ранних научных исследований различных авторов разработаны математические модели и программа расчета, приведена блок-схема алгоритма расчетов. В ней смоделированы такие явления, как поведение капель в межлопаточном канале с их испарением, образование и дробление пленки на поверхностях лопатки в тракте рабочего колеса и направляющего аппарата с одновременным испарением пленки, проведена оценка дополнительных гидравлических потерь при этих процессах. На основе разработанной методики расчета и компьютерной программы на уровне 2D-моделирования выполнены расчеты для ряда компрессоров ГТД и ГТУ с сопоставлением с имеющимися данными экспериментов и испытаний.

Аналогичный подход был реализован и в работе [2], выполненной в компании «ИЦ ОАО "ГТ-ТЭЦ ЭНЕРГО"», филиал в г. Санкт-Петербурге в сотрудничестве с Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом.

В этой работе наряду с аналогичными подходами по 2D-моделированию уделено больше внимания к процессу сепарации капель в тракте компрессора, рассмотрены варианты впрыска

воды и за компрессором, приведены примеры некоторых конструктивных решений в 3D пакете CFX ANSYS, например, надпортовых устройств в корпусе компрессора.

В доступных публикациях зарубежных исследователей [3,4] отслеживаются не такие объемные результаты исследований влияния впрыска воды в компрессор на его параметры в форме полноценных методик, а лишь оценки влияния различных факторов. Они полезны для уточнений отдельных аспектов моделирования совокупности сложных процессов, протекающих в тракте компрессора при впрыске воды.

Обращаясь к методикам и программным продуктам, используемым в УУНиТ (ранее в УГАТУ), позволяющим выполнять расчеты двигателя в целом разных конфигураций и их отдельных элементов с учетом того, что можно учитывать добавление к рабочему телу воды или водяного пара, в том числе и при термогазодинамическом расчете компрессора [5], то таковой является система имитационного моделирования DVIgWT, разработанная на кафедре АД университета под руководством Горюнова И.М., Ахмедзянова А.М. Алгоритм расчета параметров смеси при этом основан на использовании уравнений сохранения энергии, неразрывности и реализован с допущением о том, что впрыскиваемое рабочее тело мгновенно испаряется и полностью перемешивается с воздухом или газом в месте впрыска.

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ COMPRESSOR WI ДЛЯ ПОСТУПЕНЧАТОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОМПРЕССОРА ПРИ ВПРЫСКЕ ВОДЫ В ЕГО ТРАКТ**

Для разработки программы была выбрана современная интегрированная среда *Visual Studio 2022* в 64-разрядной версии, позволяющая запускать и отлаживать даже самые большие и сложные решения, не опасаясь нехватки памяти. Она удобна как для учебных целей, так и для пользователей, которые создают решения промышленного масштаба.

*Visual Studio* включает в себя [6–8] редактор исходного кода с поддержкой технологии *IntelliSense* и возможностью простейшего рефакторинга кода. Встроенный отладчик может работать как отладчик уровня исходного кода, так и отладчик машинного уровня. Остальные встраиваемые инструменты включают в себя редактор форм для упрощения создания графического интерфейса приложения, веб-редактор, дизайнер классов и дизайнер схемы базы данных. *Visual Studio* позволяет создавать и подключать сторонние дополнения (плагины) для расширения функциональности практически на каждом уровне, включая добавление поддержки систем контроля версий исходного кода, добавление новых наборов инструментов (например, для редактирования и визуального проектирования кода на предметно-ориентированных языках программирования) или инструментов для прочих аспектов процесса разработки программного обеспечения. *Visual Studio 2022* позволяет быстро и легко создавать современные облачные приложения с помощью *Azure*.

В качестве языка программирования был выбран из возможных вариантов C# (C -sharp), так как *Visual Studio 2022* предоставляет надежную поддержку рабочей нагрузки C++.

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.

В итоге принятые решения были подтверждены опытом проведения самих расчетов по исследуемой тематике на основе разработанной программы и быстротой счета с учетом нескольких уровней промежуточных итераций и обращения к справочным данным.

Выбор основных допущений для математического моделирования физических процессов при впрыске воды в тракт компрессора и теоретических предпосылок для описания этих процессов.

Как известно, при математическом моделировании весьма сложных физических и физико-химических процессов, к которым относится и рассматриваемая проблема, принимается ряд упрощающих теоретическое описание допущений, являющихся составной частью разрабатываемой модели. Относится это и к исходным данным в том числе, и к используемым в процессе

расчетов информационным данным и материалам других авторов, как теоретических, так и экспериментальных. Рассматривая вопросы моделирования процессов, протекающих в тракте компрессора при впрыске, выделим те из них, которые будут учтены при построении теоретической модели и программы расчета и те, которые при моделировании не будут учитываться.

Первое принимаемое существенное допущение заключается в том, что изменение параметров потока по высоте лопаток не учитывается (как для паровоздушной смеси, так и для впрыснутой жидкости). При этом пренебрегаем сепарацией капель впрыскиваемой жидкости под действием центробежных сил на внутреннюю поверхность корпуса компрессора. Этот фактор, как показали результаты испытаний при подводе воды в тракт компрессора, является значимым, как правило, для первых двух ступеней компрессора. Тем более, что он будет малозначимым при впрыске воды с 3-й ступени компрессора, так как испарение воды в первых 2 ступенях очень малозначительное из-за низкой температуры потока.

С другой стороны, в модели и программе расчета будут как главные факторы изменения параметров изначально двухфазного потока учитываться процессы испарения капель в межлопаточных каналах, образования и испарения пленок жидкости с поверхностями лопаток. Также в расчетной модели учтены гидравлические потери в потоке, связанные с движением пленки, ее 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. Очевидно, что упомянутые факторы учитываются только в ступенях компрессора, где поток является двухфазным. С учетом этих факторов в литературе принято считать такой подход 2D-моделированием.

Принимается также, что потери на трение основного несущего газового потока в тракте компрессора не меняются, так как расход воды по сравнению с расходом воздуха незначителен. Локальные распределения скоростей в потоке и концентрации частиц при обтекании потока с мелкими каплями микронного уровня не учитываются, то есть принимается, что испаряемая часть воды мгновенно перемешана с приходящей к данному сечению смесью воздуха с паром (газового потока).

Также ввиду малой концентрации паров воды в потоке принимается, что смесь воздуха и паров воды подчиняется уравнению состояния идеального газа. Это позволяет оперировать классическими термодинамическими уравнениями для влажного воздуха. В расчетной модели предусматривается возможность изменения в исходных данных влажности атмосферного воздуха на входе в компрессор. Зависимости удельной теплоемкости воздуха и водяного пара от температуры учитываются с применением таблиц их теплофизических свойств или аппроксимирующих уравнений, а для газовой фазы в целом по соотношениям для смеси идеальных газов. Также учитываются зависимости от температуры для других теплофизических и гидравлических величин.

С точки зрения характеристик впрыскиваемой воды принимается в модели, что капли все имеют одинаковый диаметр, соответствующий медианному, в диапазоне примерно 5–60 мкм, имеется возможность изменять давление и температуру жидкости. Ряд других допущений принимался также авторами работ, проводивших исследования и моделирование отдельных физических процессов, что нашло отражение в их математических моделях, которые использованы при составлении программы в данной работе.

На основе этих допущений была сформирована математическая модель расчета, которая включена в соответствующий блок программы расчета компрессора с впрыском жидкости в его тракт. Блок-схема алгоритма расчета по модели показана на Рис. 1 и предусматривает зацикливание расчета на нескольких уровнях с учетом необходимости последовательных приближений.

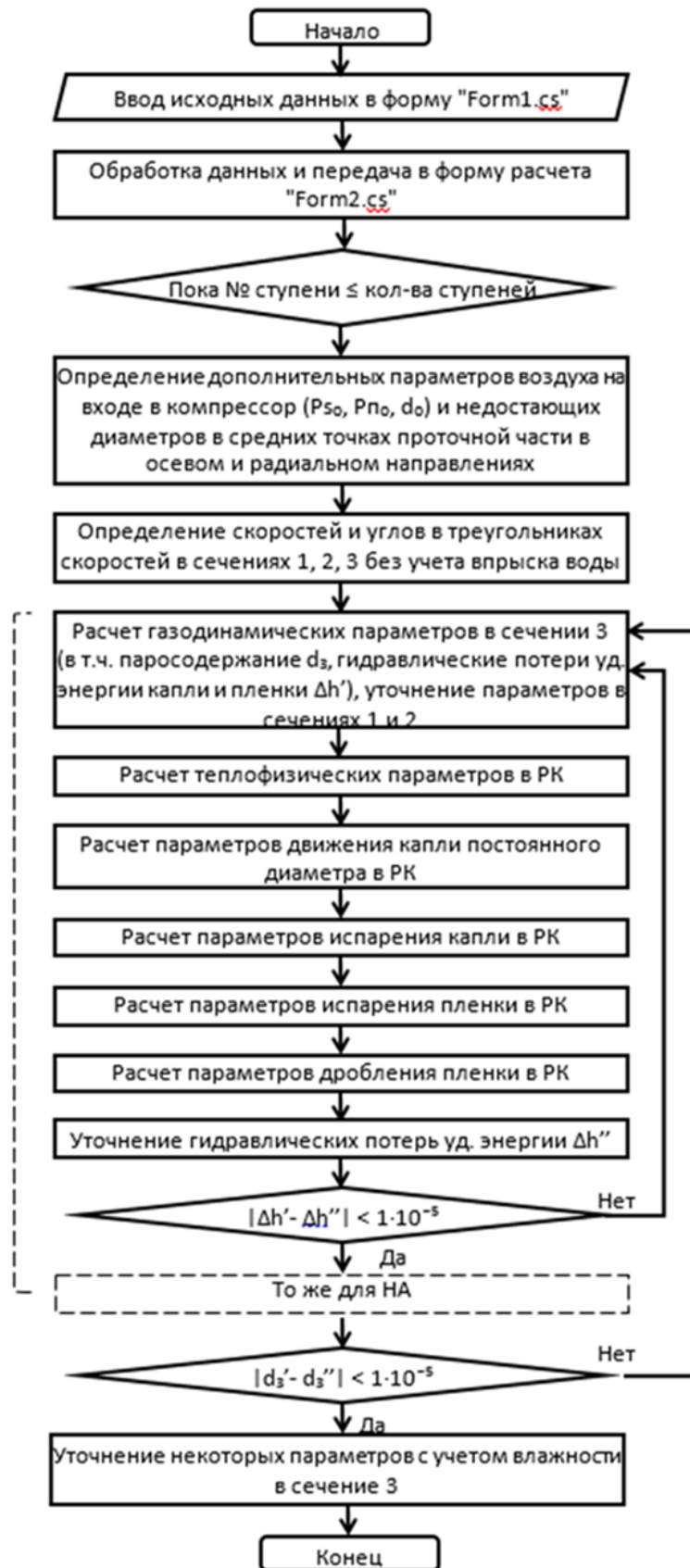


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета по модели.

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПРОГРАММЫ

Представлена разработанная программа по расчету газодинамических и теплофизических параметров паровоздушной смеси осевого многоступенчатого компрессора с учетом впрыска воды перед любой ступенью компрессора (далее «Программа»). Программа представляет собой консольное приложение на языке программирования C# (C Sharp) в среде разработки Microsoft Visual Studio Community 2022 на операционной системе Windows 10 (x64). Программе присвоено наименование «CompressorWI» [9].

Стоит отметить, что алгоритм (Рис. 1) Программы составлен не по готовой методике, а собран из различных методических данных и формул, описанных в используемой технической литературе. А машинный расчет позволяет значительно сократить время вычислений, вносить различные виды итераций по сходимости заданных и полученных величин, а также усложнять расчет введением дополнительных факторов, в частности, впрыска воды в любую ступень компрессора.

Программа содержит три формы (окна) интерфейса:

- 1) Исходные данные;
- 2) Результаты расчетов;
- 3) Сводная таблица.

**Первая форма** (Табл. 1) содержит поля (объекты `textBox`) для ввода общих параметров, таких как параметры и расход воздуха на входе в компрессор, частота вращения и количество ступеней компрессора, а также таблицу (объект `dataGridView`) параметров по ступеням. В данной форме предусмотрена возможность экспорта введенных исходных данных в текстовый файл и импорт исходных данных из текстового файла. В качестве примера создан один готовый файл исходных данных для осевого многоступенчатого компрессора АЛ-21. После ввода данных по сценарию следует нажать кнопку "Выполнить расчет", что инициирует запуск процесса расчета, после окончания которого открывается вторая форма.

**Вторая форма** содержит область (объект `listBox`), в которой содержится список всех вычислений и сообщений о произошедших событиях в процессе расчета, таких как начало и конец расчета ступени с указанием номера; точки возможного возврата вычислений при обеспечении сходимости заданных и полученных величин; точки проверки значений параметров на сходимость с указанием, будет ли произведен возврат к началу данного цикла; количество выполненных итераций в циклах. Во второй форме также предусмотрена возможность экспорта данных в текстовый файл, благодаря чему с помощью инструментов сторонних программ можно лучше проанализировать события в процессе расчета, количество произведенных итераций, отыскать момент достижения нужного значения какого-либо параметра. Кроме этого, данная форма содержит кнопку для открытия третьей формы со сводной таблицей.

**Третья форма** (Табл. 2) также содержит результаты текущего расчета, но в табличной форме (объект `dataGridView`) с указанием только основных наиболее важных параметров и их конечных значений для каждой ступени и компрессора в целом. Данная форма позволяет спортировать таблицу в открытый CSV-формат, который, с одной стороны, является текстовым, а с другой – имеет возможность открытия в табличном виде в Microsoft Excel и его аналогах.

Разработанная Программа «CompressorWI» имеет следующие достоинства:

1. Версия Microsoft Visual Studio Community – бесплатная.
2. Язык программирования C# является одним из наиболее популярных (примерно 5-е место в различных рейтингах). C# также является нейтральным или независимым от платформы языком, код которого может быть скомпилирован и запущен во всех операционных системах. Он обычно используется с платформой Microsoft .NET для Windows.
3. Наличие собственного кода позволяет при необходимости самостоятельно модернизировать расчет, расширяя его возможности и проводя различного рода эксперименты в вычислениях.

4. Наличие собственного кода дает возможность в случае необходимости переписать его на другом языке программирования и продолжить использование в других операционных системах.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- выбор типа задач;
- ввод и загрузка входных параметров;
- демонстрация хода решения;
- настройка внутренних параметров;
- выгрузка полученного решения.

Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК.

Язык: C# (C –sharp).

ОС: Windows 7, 8 и выше.

Таблица 1

Входные параметры при впрыске 2% воды в тракт компрессора

	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	...	Ступень 13	Ступень 14
$n_{pk} [-]$	33	27	44	...	103	103
$n_{на} [-]$	26	32	63	...	79	79
$\rho_k [-]$	0,5	0,5	0,5	...	0,5	0,5
$l_{ст} [Дж/кг]$	16100,0	17150,0	18100,0	...	20150,0	18100,0
$d_{н1} [М]$	0,865	0,84	0,835	...	0,76	0,76
$d_{вн1} [М]$	0,33	0,395	0,455	...	0,6725	0,68
$d_{н2} [М]$	0,845	0,8175	0,8125	...	0,76	0,76
$d_{вн2} [М]$	0,3325	0,405	0,475	...	0,67625	0,68
$d_{н3} [М]$	0,84	0,835	0,83	...	0,76	0,76
$d_{вн3} [М]$	0,395	0,455	0,51	...	0,68	0,68
$C_{1a} [М/с]$	200,0	200,0	200,0	...	130,0	120,0
$K_{ж12} [-]$	0,801	0,802	0,803	...	0,813	0,814
$K_{ж23} [-]$	0,701	0,702	0,703	...	0,713	0,714
$d_3 [-]$	0,004	0,005	0,006	...	0,016	0,017
$g_{ж1} [-]$	0,02	0,0	0,0	...	0,0	0,0
$C_{pн2} [Дж/(кг·К)]$	2000,0	2000,0	2000,0	...	2000,0	2000,0
$C_{pж} [Дж/(кг·К)]$	4186,8	4186,8	4186,8	...	4186,8	4186,8
$\eta_{ст} [-]$	0,8	0,82	0,82	...	0,8	0,8
$K_G [-]$	0,0404	0,0404	0,0404	...	0,0404	0,0404
$\sigma_{на} [-]$	0,99	0,99	0,99	...	0,99	0,99
$T_{ж0} [К]$	288,15	288,15	288,15	...	288,15	288,15
$K_{жж} [-]$	0,95	0,95	0,95	...	0,95	0,95
$d_k [М]$	0,000040	0,000040	0,000040	...	0,000040	0,000040
$b_{pk} [М]$	0,075	0,068	0,053	...	0,031	0,031
$K_T [-]$	1,0	1,0	1,0	...	1,0	1,0
$\sigma_{ж} [Н/М]$	0,073	0,073	0,073	...	0,073	0,073
$b_{на} [М]$	0,079	0,068	0,042	...	0,033	0,033

Выходные параметры при впрыске 2% воды в тракт компрессора

	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	...	Ступень 13	Ступень 14
$\phi_1$ [-]	0,3	0,101564	0,063162	...	0,008125	0,006598
$\phi_3$ [-]	0,101564	0,063162	0,043794	...	0,006598	0,005469
$T_1$ [K]	265,0341	279,9099	294,8769	...	513,2275	533,1475
$T_2$ [K]	282,0129	290,1679	300,5274	...	510,7441	526,3223
$T_3$ [K]	284,4721	299,9222	314,7933	...	530,9649	548,7886
$T_1^*$ [K]	288,15	303,2642	318,5769	...	526,0203	545,1796
$T_2^*$ [K]	303,2642	318,5769	334,5725	...	545,1796	562,3476
$T_3^*$ [K]	303,2642	318,5769	334,5725	...	545,1796	562,3476
$P_1$ [Па]	92264,55	89649,71	104901,7	...	860702,9	963311,4
$P_2$ [Па]	91266,33	98574,13	109127,9	...	829803,2	904680,1
$P_3$ [Па]	93119,28	109503,1	127049,2	...	945915,3	1042802
$P_1^*$ [Па]	100311,8	116281,8	135123	...	938238,9	1041173
$P_2^*$ [Па]	117456,3	136487,8	158796,2	...	1051690	1151188
$P_3^*$ [Па]	116281,8	135123	157208,2	...	1041173	1139676
$\pi_{ст}$ [-]	1,159204	1,162031	1,163445	...	1,10971	1,094608
$\Pi\pi_{ст}(\pi_k)$ [-]	1,159204	1,34703	1,567196	...	10,37937	11,36134
$G_B$ [кг/с]	86	86	86	...	86	86
$G_{ж1впр}$ [кг/с]	1,72	0	0	...	0	0
$G_{ж1}$ [кг/с]	1,72	1,711029	1,686219	...	0	0
$G_{ж12}$ [кг/с]	1,71993	1,702764	1,671343	...	0	0
$G_{ж23}$ [кг/с]	1,711029	1,686219	1,65092	...	0	0
$G_{н1}$ [кг/с]	0,058402	0,076683	0,110245	...	1,752393	1,751658
$G_{н2}$ [кг/с]	0,058472	0,084948	0,125121	...	1,752393	1,751658
$G_{н3}$ [кг/с]	0,076683	0,110245	0,15167	...	1,751658	1,751092
$G_{нв1}$ [кг/с]	86,0584	86,07668	86,11025	...	87,75239	87,75166
$G_{нв2}$ [кг/с]	86,05847	86,08495	86,12512	...	87,75239	87,75166
$G_{нв3}$ [кг/с]	86,07668	86,11025	86,15167	...	87,75166	87,75109
$G_1$ [кг/с]	87,7784	87,78771	87,79646	...	87,75239	87,75166
$G_2$ [кг/с]	87,7784	87,78771	87,79646	...	87,75239	87,75166
$G_3$ [кг/с]	87,78771	87,79646	87,80259	...	87,75166	87,75109
$d_k$ [м]	4,00E-05	1,33E-05	1,26E-05	...	0	0
$d_{k2}$ [м]	1,14E-05	1,24E-05	1,12E-05	...	0	0
$d_{k3}$ [м]	1,33E-05	1,26E-05	1,11E-05	...	0	0
$m_k$ [кг]	3,35E-11	1,24E-12	1,05E-12	...	0	0
$m_{k2}$ [кг]	7,84E-13	9,89E-13	7,36E-13	...	0	0
$m_{k3}$ [кг]	1,24E-12	1,05E-12	7,07E-13	...	0	0
$n_k$ [1/с]	5,14E+10	1,38E+12	1,61E+12	...	0	0
$n_{k2}$ [1/с]	2,19E+12	1,72E+12	2,27E+12	...	0	0
$n_{k3}$ [1/с]	1,38E+12	1,61E+12	2,33E+12	...	0	0
$d_1$ [-]	0,000679	0,000892	0,001282	...	0,020377	0,020368
$d_2$ [-]	0,00068	0,000988	0,001455	...	0,020377	0,020368
$d_3$ [-]	0,000892	0,001282	0,001764	...	0,020368	0,020362
$l_{ст}$ [Дж/кг]	16100	17150	18100	...	20150	18100
$N_{ст}$ [Вт]	1385687	1476503	1558970	...	1768203	1588300
$K_{ПВ23}$ [-]	1,402631	1,401206	1,399727	...	1,379877	1,378944



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа предназначена для расчета и проектирования осевых лопаточных компрессоров ГТД и ГТУ с учетом возможности впрыска жидкости (воды) в тракт для улучшения их характеристик. Тестовые расчеты проведены на примере 14-ступенчатого компрессора ГТД АЛ-21 с впрыском до 3% расхода воды по отношению к расходу воздуха, при котором обеспечивалось полное ее испарение в тракте компрессора.

Программа поддерживает решение следующих задач:

- поступенчатый расчет параметров рабочего тела в тракте осевого лопаточного компрессора с учетом наличия в нем водяного пара и воды, процессов капельного и пленочного испарения жидкости;
- 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;
- расчет параметров рабочего тела на выходе компрессора и параметров компрессора при различных вариантах распределения работы по ступеням и КПД ступеней;
- проведение вышеуказанных расчетов на всех режимах работы компрессора по оборотам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зунг Д.Т.** Влияние впрыска воды в компрессор на характеристики газотурбинных энергетических установок: дис. кандидата технических наук. Москва, 2013. 100 с. [Dung D.T. Effect of water injection into the compressor on the characteristics of gas-turbine power plants: Cand. Sci. thesis. Moscow, 2013. 100 p. (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. Санкт-Петербург, 2010. 173 с. [Skvortsov A.V. Increasing the parameters of gas-turbine plants by means of water injection into the wheelspace and the optimization of the working process in the compressor: Cand. Sci. thesis. Saint Petersburg, 2010. 173 p. (in Russian)].
3. **Block Novelo DA., Igie U., Prakash V., Szymanski A.** Experimental investigation of gas turbine compressor water injection for NOx emission reductions // Energy. 2019. Vol. 176. P. 235–248.
4. **Roumeliotis I., Mathioudakis K.** Evaluation of water injection effect on compressor and engine performance and operability // Applied Energy. 2010. Vol. 87. P. 1207–1216.
5. **Горюнов И.М.** Термогазодинамические расчеты в программном комплексе DVIGwT: учебное пособие. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022 [Goryunov I.M. Thermogasdynamic calculations in the DVIGwT software: study guide. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2022 (in Russian)].
6. **Описание Microsoft Visual Studio:** [https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft\\_Visual\\_Studio](https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio) [Description of Microsoft Visual Studio: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft\\_Visual\\_Studio](https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio) (in Russian)].
7. **Visual Studio 2022** хабр: <https://habr.com/ru/companies/microsoft/articles/553442/> [Visual Studio 2022 habr: <https://habr.com/ru/companies/microsoft/articles/553442/> (in Russian)].
8. **Новые возможности Visual Studio:** <https://learn.microsoft.com/ru-ru/visualstudio/ide/whats-new-visual-studio-2022?view=vs-2022> [New capabilities of Visual Studio: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/visualstudio/ide/whats-new-visual-studio-2022?view=vs-2022> (in Russian)].
9. **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 CompressorWI» от 17.08.2023 г. [Bakirov F.G., Ma J., Bakirov R.F., Akhtyamova O.F. Software registration certificate No. 2023667694 “CompressorWI software for the calculation of a compressor with water injection” dated 17.08.2023 (in Russian)].

## ОБ АВТОРАХ

**БАКИРОВ Федор Гайфуллович**, д.т.н., профессор каф. АТиТ УУНиТ. Иссл. в области авиационных двигателей и энергоустановок, теплофизики процессов горения, теплотехники и теплоэнергетики.

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

**БАКИРОВ Руслан Фирдусович**, инженер, ООО «Петроинжиниринг». Иссл. в области информационных технологий.

**АХТЯМОВА Олеся Фаилевна**, инженер, ООО «Югранефтегазпроект». Иссл. в области информационного моделирования.

## METADATA

**Title:** CompressorWI software for calculating the parameters of a compressor with water injection into its path.

**Authors:** F.G. Bakirov<sup>1</sup>, J. Ma<sup>2</sup>, R.F. Bakirov<sup>3</sup>, O.F. Akhtyamova<sup>4</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2</sup> Ufa University of Science and Technology, Russia.

<sup>3</sup> Petroengineering LLC, Russia

<sup>4</sup> Yugraneftgazproekt LLC, Russia

**Email:** <sup>1</sup> fgbakirov@bk.ru, <sup>2</sup> jiarui2015@yandex.ru, <sup>3</sup> bakirov.ruslan@mail.ru, <sup>4</sup> foresight.OF@yandex.ru

**Language:** Russian

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 4 (102), pp. 67-76, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article examines the features and capabilities of the software developed by the authors for the calculation of compressor parameters at different variants of liquid (water) injection into the path of axial vane compressor of a GTE or GTU in the Visual Studio 2022 environment in the 64-bit version in the C# (C Sharp) programming language.

**Key words:** GTE compressor; liquid injection; software for parameter calculation; programming environment and language; block diagram of calculation; table forms.

**About authors:**

**BAKIROV Fedor Gayfullovich**, Research in the field of aircraft engines and power plants, thermophysics of combustion processes, heat engineering and thermal power engineering.

**MA Jiarui**, Research in the field of aircraft engines and power plants, modeling of gas turbine engine work processes and development of calculation software.

**BAKIROV Ruslan Firdusovich**, Research in the field of information technology.

**AKHTYAMOVA Failevna Akhtyamova**, Research in the field of information modeling.