



(19) KG (11) 402 (13) C2 (46) 30.09.2024

(51) G06F 30/15 (2024.01)

G06F 30/28 (2024.01)

F04D 27/02 (2024.01)

G06F 30/17 (2024.01)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ АГЕНТСТВО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ И ИННОВАЦИЙ  
ПРИ КАБИНЕТЕ МИНИСТРОВ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ (КЫРГЫЗПАТЕНТ)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ к патенту Кыргызской Республики

(21) 20230023.1

(22) 27.03.2023

(31) 202011161387.0

(32) 27.10.2020

(33) CN

(86) PCT/CN2021/126705

(46) 30.09.2024. Бюл. № 9

(71) (73) № 703 РИСЁЧ ИНСТИТЮТ  
ОФ ЧАЙНА ШИПБИЛДИНГ ИНДАСТРИ  
КОРПОРЕЙШН (CN)

(72) ЛИНЬ, Фэн (CN)

ВАН, Ци (CN)

ВАН, СинъчАО (CN)

ЛИ, Дун (CN)

ВАН, Тин (CN)

ЖЭНЬ, Ланьсюэ (CN)

ЧЖАН, Чжоу (CN)

ХУН, Цинсун (CN)

(56) CN № 112487565, В, кл. G06F 30/17,  
F04D 27/02, 12.03.2021

(54) Способы установки и регулирования  
угла поворота поворотных направляющих  
лопаток, осевой компрессор и газовая тур-  
бина

(57) Изобретение относится к способам уст-  
новки и регулирования угла поворота пово-  
ротных направляющих лопаток осевого ком-  
прессора, осевому компрессору и газовой  
турбине.

Согласно настоящему изобретению спо-  
собы установки и регулирования угла поворо-  
та поворотных направляющих лопаток осево-  
го компрессора судовой газовой турбины в  
нижнем рабочем режиме, в которых получают

аэродинамические параметры в области ха-  
рактеристического сечения смежного заднего  
ряда подвижных лопаток каждого ряда пово-  
ротных направляющих лопаток в компрессо-  
ре; находят приведенную скорость в нижнем  
рабочем режиме компрессора и приведенную  
скорость в расчетной точке; вычисляют  
окружную скорость подвижных лопаток;  
устанавливают приведенную интенсивность  
потока; вычисляют входную осевую скорость  
для каждого ряда подвижных лопаток; задают  
ожидаемый входной угол атаки подвижных  
лопаток следующего уровня; получают вход-  
ной относительный угол потока подвижных  
лопаток следующего уровня после поворота  
каждого ряда поворотных направляющих лопаток;  
находят угол вращения для каждого  
ряда поворотных направляющих лопаток;  
получают закономерность угла поворота по-  
вортных направляющих лопаток компрессо-  
ра при разных приведенных скоростях. С по-  
мощью этого способа можно эффективно  
повысить показатель запаса по помпажу ком-  
прессора в нижнем рабочем режиме. Газовая  
турбина содержит осевой компрессор, содер-  
жащий один ряд или несколько рядов пово-  
ротных направляющих лопаток, при этом на  
следующем уровне каждого ряда поворотных  
направляющих лопаток смежно расположены  
один ряд подвижных лопаток и управляющее  
устройство, выполненное с возможностью  
регулирования угла поворота поворотных  
направляющих лопаток осевого компрессора.

4 н. п. ф., 9 з. п. ф., 3 фиг.

(19) KG (11) 402 (13) C2 (46) 30.09.2024

## 3

Варианты осуществления настоящего изобретения относятся к способам установки и регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора, осевому компрессору и газовой турбине.

Компрессор является одним из наиболее важных трех основных компонентов судовой газовой турбины, и его технические характеристики и надежность непосредственно влияют на обеспечение показателей безопасности и экономичности судовой газовой турбины. Для соответствия тактико-техническим требованиям к процессу судовождения судовая газовая турбина наряду с обеспечением эффективности в расчетных точках также должна работать с высокой эффективностью в нерасчетном режиме, в частности работать с достаточно высокой эффективностью в нижнем рабочем режиме. Ввиду особенностей работы в значительно меняющемся рабочем режиме весьма актуальной является проблема стабильности нижнего рабочего режима газовой турбины, когда последняя используется в качестве судовой энергосистемы для обеспечения движения или генерирования электричества, которая часто становится проблемой ограничения производительности агрегата; в этом случае к производительности и стабильности компрессора судовой газовой турбины в нерасчетном режиме предъявляются более высокие требования. Следовательно, чтобы судовая газовая турбина характеризовалась широким диапазоном стабильной работы и лучшей производительностью в условиях изменения режимов, часто необходимо применять технологии стабильного расширения с предотвращением помпажа, чтобы повысить показатель запаса по помпажу ее компрессора в нижнем рабочем режиме.

В технологиях стабильного расширения с предотвращением помпажа компрессора технология поворотных направляющих лопаток является важным техническим средством повышения производительности компрессора в нерасчетном режиме. По мере непрерывного повышения требований к судовой газовой турбине в отношении показателя запаса по помпажу компрессора в нижнем рабочем режиме также непрерывно развиваются технологии проектирования поворотных направляющих лопаток компрессора для предотвра-

## 4

щения помпажа и обеспечения стабильности расширения. В то же время по мере постепенного увеличения количества рядов поворотных направляющих лопаток и постоянного ускорения регулирования поворотных направляющих лопаток стремительно возрастают объемы выборки на основе решения с комбинацией разных углов между несколькими рядами поворотных направляющих лопаток, что приводит к большей сложности и трудностям в проектировании закономерностей комплексного регулирования углов поворота нескольких рядов поворотных направляющих лопаток компрессора.

Согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения предложены способ установки и способ регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора судовой газовой турбины, с помощью которых можно эффективно повысить запас по помпажу компрессора (в частности, в нижнем рабочем режиме), а также соответствующие осевой компрессор и газовая турбина, обладающие высоким запасом по помпажу.

В одном варианте осуществления настоящего изобретения предложен способ установки угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора, при этом осевой компрессор содержит один ряд или несколько рядов поворотных направляющих лопаток, и на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток предусмотрен один ряд подвижных лопаток, расположенный смежно с этим рядом поворотных направляющих лопаток, при этом способ включает этапы, на которых:

(1) выбирают характеристическое сечение для расчета угла поворота поворотных направляющих лопаток;

(2) выбирают один ряд поворотных направляющих лопаток и получают аэродинамические параметры в области характеристического сечения подвижных лопаток следующего уровня ряда поворотных направляющих лопаток компрессора в расчетной точке, содержащие: входную осевую скорость  $C_{1a}$ , окружную скорость  $U$ , входной абсолютный угол  $\alpha_1$  потока и входной относительный угол  $\beta_1$  потока;

(3) на основе приведенной скорости  $n'$  компрессора в нерасчетном режиме и приведенной скорости  $n$  компрессора в расчетной точке вычисляют окружную скорость  $U'$  подвижных лопаток при таких приведенных скоростях;

(4) задают приведенную интенсивность  $G'$  потока, ожидаемо достигаемую путем регулирования поворота ряда поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости  $n'$ ; на основе приведенной интенсивности  $G'$  потока и приведенной интенсивности  $G$  потока в компрессоре в расчетной точке вычисляют входную осевую скорость  $C_{1a}'$  подвижных лопаток при такой приведенной скорости;

(5) задают ожидаемый входной угол  $i$  атаки подвижных лопаток следующего уровня, получаемый путем регулирования поворота ряда поворотных направляющих лопаток, и на основе ожидаемого входного угла  $i$  атаки получают входной относительный угол  $\beta_1'$  потока подвижных лопаток следующего уровня после поворота поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости; на основе окружной скорости  $U'$  подвижных лопаток, входной осевой скорости  $C_{1a}'$  подвижных лопаток и входного относительного угла  $\beta_1'$  потока подвижных лопаток при приведенной скорости вычисляют входной абсолютный угол  $\alpha_1'$  потока подвижных лопаток после поворота поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости и находят угол  $\Delta\alpha$  вращения ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости  $n'$ .

Предпочтительно, например, согласно этапам (1)-(5) вычисляют угол вращения для каждого ряда поворотных направляющих лопаток.

Предпочтительно, например, задают несколько дополнительных приведенных скоростей, отличающихся от приведенной скорости; и вычисляют угол вращения соответственно для каждого ряда поворотных направляющих лопаток согласно этапам (1)-(5) при каждой дополнительной приведенной скорости.

Предпочтительно, например, аэродинамические параметры в области характеристического сечения подвижных лопаток следующего уровня  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток компрессора в расчетной

точке содержат: входную осевую скорость  $C_{1a,j}$ , окружную скорость  $U_j$ , входной абсолютный угол  $\alpha_{1,j}$  потока и входной относительный угол  $\beta_{1,j}$  потока, при этом на основе нижеследующей формулы получают окружную скорость  $U_j'$  подвижных лопаток при приведенной скорости:

$$U_j' = U_j \cdot \frac{n'}{n}, \quad j \text{ представляет собой натуральное число.}$$

Предпочтительно, например, на основе нижеследующей формулы получают входную осевую скорость  $C_{1a,j}'$  подвижных лопаток следующего уровня  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости:

$$C_{1a,j}' = \delta_{c,j} C_{1a,j} \cdot \frac{G'}{G},$$

при этом  $\delta_{c,j}$  представляет собой поправочный коэффициент входной осевой скорости подвижных лопаток.

Предпочтительно, например, задают ожидаемый входной угол  $i_j$  атаки подвижных лопаток следующего уровня, получаемый путем регулирования поворота  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток, и на основе нижеследующей формулы получают входной относительный угол  $\beta_{1,j}'$  потока подвижных лопаток следующего уровня после поворота  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости:

$$\beta_{1,j}' = \beta_{1,j} - i_j.$$

Предпочтительно, например, согласно окружной скорости  $U_j'$  подвижных лопаток, входной осевой скорости  $C_{1a,j}'$  подвижных лопаток и входному относительному углу  $\beta_{1,j}'$  потока подвижных лопаток при приведенной скорости на основе нижеследующей формулы получают входной абсолютный угол  $\alpha_{1,j}'$  потока подвижных лопаток после поворота поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости:

$$\alpha_{1,j}' = \arctan \left( \frac{C_{1a,j}'}{U_j' - C_{1a,j}' / \tan \beta_{1,j}'} \right).$$

Предпочтительно, например, на основе нижеследующей формулы получают угол  $\Delta\alpha_j$  вращения  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости  $n'$ :

$$\Delta\alpha_j = \alpha_{1,j}' - \alpha_{1,j}.$$

Предпочтительно нерасчетный режим представляет собой нижний рабочий режим.

Согласно другому варианту осуществления настоящего изобретения также предложен способ регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора, при этом осевой компрессор содержит один ряд или несколько рядов поворотных направляющих лопаток, и на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток смежно расположены один ряд подвижных лопаток, при этом на основе угла вращения поворотных направляющих лопаток, полученного способом согласно варианту осуществлению, представленному в любом предыдущем абзаце, регулируют угол поворота поворотных направляющих лопаток.

Предпочтительно, например, регулирование угла поворота поворотных направляющих лопаток на основе способа согласно варианту осуществлению, представленному в любом предыдущем абзаце, включает: регулирование угла поворота каждого ряда поворотных направляющих лопаток на основе справочной таблицы, при этом справочная таблица содержит несколько разных приведенных скоростей и отношения соответствия для угла поворота каждого ряда поворотных направляющих лопаток; получение угла поворота для каждого ряда поворотных направляющих лопаток компрессора при нескольких разных приведенных скоростях на основе способа согласно варианту осуществлению, представленному в любом предыдущем абзаце.

Согласно еще одному варианту осуществления настоящего изобретения также предложен осевой компрессор, при этом осевой компрессор содержит один ряд или несколько рядов поворотных направляющих лопаток, и на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток смежно расположены один ряд подвижных лопаток; осевой компрессор дополнитель но содержит управляющее устройство, при этом

управляющее устройство согласно вышеописанному способу регулирования регулирует угол поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора.

Согласно еще одному варианту осуществления настоящего изобретения также предложена газовая турбина, которая содержит осевой компрессор, представленный в предыдущем пункте.

На фиг. 1 представлено изображение сквозного потока представленного в качестве примера варианта осуществления осевого компрессора согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения, на котором показаны поворотные направляющие лопатки и подвижные лопатки осевого компрессора;

на фиг. 2 представлена блок-схема способа согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 3 представлено изображение принципов проектирования закономерности угла поворота поворотных направляющих лопаток компрессора и определения аэродинамических параметров согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения.

Ниже со ссылками на прилагаемые графические материалы более подробно описаны в качестве примера варианты осуществления настоящего изобретения.

Способ согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения предназначен для установки и регулирования угла поворота одного ряда или нескольких рядов поворотных направляющих лопаток осевого компрессора.

На фиг. 1 представлено изображение сквозного потока в представленном в качестве примере варианте осуществления осевого компрессора, который относится к по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения, при этом показано расположение лопаток осевого компрессора. Можно заметить, что в осевом компрессоре расположено четыре ряда поворотных направляющих лопаток, и на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток смежно с этим рядом поворотных направляющих лопаток расположен один ряд подвижных лопаток. Путем регулирования угла поворота каждого ряда поворотных направляющих лопаток может быть обеспе-

чен входной угол атаки подвижных лопаток следующего уровня, соответствующий ожиданиям.

Со ссылкой на фиг. 2-3; конкретный способ осуществления способа расчета закономерности угла поворота поворотных направляющих лопаток в нерасчетном режиме осевого компрессора судовой газовой турбины согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения выполняют с помощью следующих этапов, на которых:

(1) выбирают характеристическое сечение для расчета угла поворота поворотных направляющих лопаток;

(2) выбирают один ряд поворотных направляющих лопаток и получают аэродинамические параметры в области характеристического сечения подвижных лопаток следующего уровня ряда поворотных направляющих лопаток компрессора в расчетной точке, содержащие: входную осевую скорость  $C_{1a}$ , окружную скорость  $U$ , входной абсолютный угол  $\alpha_1$  потока и входной относительный угол  $\beta_1$  потока;

(3) на основе приведенной скорости  $n'$  компрессора в нерасчетном режиме и приведенной скорости  $n$  компрессора в расчетной точке вычисляют окружную скорость  $U'$  подвижных лопаток при таких приведенных скоростях;

(4) задают приведенную интенсивность  $G'$  потока, ожидаемую достигаемую путем регулирования поворота ряда поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости  $n'$ ; на основе приведенной интенсивности  $G'$  потока и приведенной интенсивности  $G$  потока в компрессоре в расчетной точке вычисляют входную осевую скорость  $C_{1a}'$  подвижных лопаток при такой приведенной скорости;

(5) задают ожидаемый входной угол  $i$  атаки подвижных лопаток следующего уровня, получаемый путем регулирования поворота ряда поворотных направляющих лопаток, и на основе ожидаемого входного угла  $i$  атаки получают входной относительный угол  $\beta_1'$  потока подвижных лопаток следующего уровня после поворота поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости; на основе окружной скорости  $U'$  подвижных лопаток, входной осевой скорости  $C_{1a}'$  подвижных лопаток и входного относи-

тельного угла  $\beta_1'$  потока подвижных лопаток при приведенной скорости вычисляют входной абсолютный угол  $\alpha_1'$  потока подвижных лопаток после поворота поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости и находят угол  $\Delta\alpha$  вращения ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости  $n'$ .

Вышеуказанные этапы (1)-(5) не обязательно должны выполняться в поочередной последовательности, представленной в описании; например, после выполнения этапа (4) может идти этап (3) и т. д.

На этапе (5), на котором «задают ожидаемый входной угол  $i$  атаки подвижных лопаток следующего уровня, получаемый путем регулирования поворота каждого ряда поворотных направляющих лопаток», при нормальных условиях принимают  $i = 0$ , чтобы обеспечивалось сохранение соответствия входного относительного угла потока подвижных лопаток следующего уровня после поворота поворотных направляющих лопаток расчетной точке; также на основании идеи проектирования разной стабильности расширения поворотных направляющих лопаток в нерасчетном режиме можно надлежащим образом выбрать определенное положительное/отрицательное значение угла атаки, чтобы получить эффективность регулирования поворотных направляющих лопаток, соответствующих идеи проектирования.

В случае если имеется больше чем один ряд поворотных направляющих лопаток, то в по меньшей мере одном варианте осуществления настоящего изобретения согласно этапам (1)-(5) также можно вычислить угол вращения для каждого ряда поворотных направляющих лопаток, чтобы установить соответствующую величину угла поворота для каждого ряда поворотных направляющих лопаток.

Кроме того, согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения не только соответственно вычисляют соответствующую величину угла поворота для каждого ряда поворотных направляющих лопаток при некоторой скорости, но и выбирают несколько особых приведенных скоростей и при каждой особой приведенной скорости соответственно вычисляют соответствующую величину угла поворота для каждого ряда поворотных направляющих лопаток.

## 11

ток. Таким образом, после вычисления угла поворота при приведенной скорости  $n'$  в нерасчетном режиме, основанного на изложенном выше, вариант осуществления настоящего изобретения также может включать задание нескольких дополнительных приведенных скоростей, отличающихся от приведенной скорости  $n'$ ; и вычисление угла вращения соответственно для каждого ряда поворотных направляющих лопаток согласно этапам (1)-(5) при каждой дополнительной приведенной скорости.

Для  $j$  рядов поворотных направляющих лопаток конкретные этапы выполнения согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения следующие:

этап 1: выбирают характеристическое сечение для расчета угла поворота поворотных направляющих лопаток. Характеристическое сечение обычно выбирают вдоль области среднего радиуса высоты лопатки, при этом значение среднего радиуса может быть вычислено с помощью метода среднего арифметического или метода средневзвешенного по площади; для вычисления угла поворота поворотных направляющих лопаток также вдоль высоты лопатки можно выбрать несколько характеристических сечений, чтобы в ситуациях разной потери скорости (например, потери скорости в области верхней части лопатки или хвостовика лопатки) оценивать значение угла поворота поворотных направляющих лопаток;

этап 2: получают необходимые аэродинамические параметры в области характеристического сечения смежного заднего ряда подвижных лопаток  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток в компрессоре в расчетной точке (при этом все углы поворота поворотных направляющих лопаток составляют  $0^\circ$ ), содержащие: входную осевую скорость  $C_{1a,j}$ , окружную скорость  $U_j$ , входной абсолютный угол  $\alpha_{1,j}$  потока и входной относительный угол  $\beta_{1,j}$  потока. Вышеуказанные аэродинамические параметры могут быть получены путем выполнения расчета полной трехмерной CFD-модели в расчетной точке всего компрессора, и они также могут быть получены путем конструктивного расчета квазитрехмерного сквозного потока в компрессоре;

## 12

этап 3: на основе приведенной скорости  $n'$  компрессора в нерасчетном режиме и приведенной скорости  $n$  компрессора в расчетной точке, необходимых для нахождения угла вращения поворотных направляющих лопаток, вычисляют окружную скорость  $U'_j$  подвижных лопаток при такой приведенной скорости, при этом способ вычисления следующий:

$$U'_j = U_j \cdot \frac{n'}{n};$$

этап 4: устанавливают приведенную интенсивность  $G'$  потока, ожидаемо достигаемую при такой приведенной скорости  $n'$  путем регулирования поворота поворотных направляющих лопаток, и в сочетании с приведенной интенсивностью  $G$  потока в компрессоре в расчетной точке вычисляют входную осевую скорость  $C'_{1a,j}$  заднего ряда подвижных лопаток  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости. При вычислении необходимо учитывать влияние, которое одновременное действие нескольких рядов поворотных направляющих лопаток оказывает на общую эффективность регулирования входной осевой скорости каждого ряда подвижных лопаток, и вносить корректировки. Способ вычисления следующий:

$$C'_{1a,j} = \delta_{c,j} C_{1a,j} \cdot \frac{G'}{G},$$

где  $\delta_{c,j}$  представляет собой поправочный коэффициент входной осевой скорости подвижных лопаток, который связан с общим количеством  $N$  рядов поворотных направляющих лопаток компрессора, последовательностью  $j$  поворотных направляющих лопаток в этом ряду, а также с коэффициентом  $\psi_j$  нагрузки и степенью  $\Omega_j$  реактивности следующего уровня, то есть:

$$\delta_{c,j} = f(N, j, \psi_j, \Omega_j).$$

В одном предпочтительном способе осуществления конкретный способ вычисления  $\delta_{c,j}$  следующий:

13  
если  $j = 1$ , то  $\delta_{c,j} = 1$ ;

$$\delta_{c,j} = \left( \frac{\Omega_j}{\psi_j} \right)^{\frac{j}{N+j}}$$

если  $j > 1$ , то .

В случае разного расположения поворотных направляющих лопаток и распределения нагрузки в компрессоре для каждого ряда поворотных направляющих лопаток могут быть последовательно установлены разные поправочные коэффициенты;

этап 5: находят угол  $\Delta\alpha_j$  вращения  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости  $n'$ . Задают ожидаемый входной угол  $i_j$  атаки подвижных лопаток следующего уровня, получаемый путем регулирования поворота  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток, и получают входной относительный угол  $\beta_{1,j}'$  потока подвижных лопаток следующего уровня после поворота  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости, при этом способ вычисления следующий:

$$\beta_{1,j}' = \beta_{1,j} - i_j.$$

На основе окружной скорости  $U_j'$  каждого ряда подвижных лопаток, входной осевой скорости  $C_{1a,j}'$  подвижных лопаток и входного относительного угла  $\beta_{1,j}'$  потока подвижных лопаток при такой приведенной скорости вычисляют входной абсолютный угол  $\alpha_{1,j}'$  потока каждого ряда подвижных лопаток после поворота поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости, при этом способ вычисления следующий:

$$\alpha_{1,j}' = \arctan \left( \frac{C_{1a,j}'}{U_j' - C_{1a,j}' / \tan \beta_{1,j}'} \right).$$

И затем находят угол  $\Delta\alpha_j$  вращения  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости  $n'$ , при этом способ вычисления следующий:

$$\Delta\alpha_j = \alpha_{1,j}' - \alpha_{1,j}.$$

14

Таким образом, последовательно получают угол вращения для каждого ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости.

Аналогично вышеуказанные этапы 1-5 не обязательно должны выполняться в поочередной последовательности, представленной в описании; например, после выполнения этапа 4 может идти этап 3 и т. д.;

этап 6: аналогично согласно вышеуказанным этапам вычисляют угол вращения для каждого ряда поворотных направляющих лопаток соответственно при каждой особой приведенной скорости, получают угол вращения для каждого ряда поворотных направляющих лопаток компрессора при разных приведенных скоростях и затем определяют закономерность угла поворота для каждого ряда поворотных направляющих лопаток компрессора.

Согласно одному предпочтительному варианту осуществления нерасчетный режим представляет собой нижний рабочий режим. Нижний рабочий режим газовой турбины означает частичный рабочий режим. Диапазон режимов работы газовой турбины очень широкий; например, в судовой газовой турбине диапазон рабочих режимов охватывает 0,2-1,0 рабочий режим, при этом 0,6 рабочего режима и ниже используют постоянно, и обычно 0,6 рабочего режима и ниже относят к промежутку нижних рабочих режимов.

Варианты осуществления настоящего изобретения также относятся к способу регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора, при этом осевой компрессор содержит один ряд или несколько рядов поворотных направляющих лопаток, и на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток смежно расположен один ряд подвижных лопаток. В этом способе регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора на основе угла вращения поворотных направляющих лопаток, полученного способом установки угла поворота поворотных направляющих лопаток согласно любому вышеизложенному варианту осуществления, регулируют угол поворота поворотных направляющих лопаток.

## 15

Согласно одному конкретному варианту осуществления регулирование угла поворота поворотных направляющих лопаток на основе способа установки согласно любому вышеизложенному варианту осуществления включает регулирование угла поворота каждого ряда поворотных направляющих лопаток на основе справочной таблицы. Например, справочная таблица представляет собой массив или структуру данных, в которых операциями запроса заменены вычисления времени выполнения, но она именно этим не ограничивается, и путем предварительных вычислений можно подготовить эту справочную таблицу в виде резервной копии, например, сохранить во флеш-памяти. По меньшей мере одном варианте осуществления настоящего изобретения справочная таблица содержит несколько разных приведенных скоростей и отношения соответствия для угла поворота каждого ряда поворотных направляющих лопаток; на основе способа установки угла поворота поворотных направляющих лопаток согласно любому вышеизложенному варианту осуществления получают угол поворота для каждого ряда поворотных направляющих лопаток компрессора при нескольких разных приведенных скоростях.

Варианты осуществления настоящего изобретения также относятся к осевому компрессору, при этом осевой компрессор содержит один ряд или несколько рядов поворотных направляющих лопаток, при этом на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток смежно расположены один ряд подвижных лопаток. Кроме того, осевой компрессор дополнительно содержит управляющее устройство, при этом управляющее устройство выполнено с возможностью регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора на основе способа регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток согласно любому вышеизложенному варианту осуществления. Такой осевой компрессор, в частности, представляет собой осевой компрессор, используемый в судовой газовой турбине.

Варианты осуществления настоящего изобретения также относятся к газовой турбине, содержащей осевой компрессор согласно любому вышеизложенному варианту осуществления. Например, эта газовая турбина, в

## 16

частности, представляет собой газовую турбину, используемую на судах, но варианты осуществления настоящего изобретения этим не ограничиваются.

Преимущества по меньшей мере одного варианта осуществления настоящего изобретения заключаются в следующем.

1. Способ установки и способ регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения обеспечивают быстрый и эффективный путь реализации технологии стабильного расширения с предотвращением помпажа для поворотных направляющих лопаток компрессора; закономерность угла поворота поворотных направляющих лопаток компрессора, полученная с помощью по меньшей мере одного варианта осуществления настоящего изобретения, позволяет эффективно повысить показатель запаса по помпажу компрессора, в частности показатель запаса по помпажу в нижнем рабочем режиме, для обеспечения технической поддержки решения проблемы «узких мест» при работе судовой газовой турбины в нижнем рабочем режиме.

2. С помощью способа установки и способа регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора согласно по меньшей мере одному варианту осуществления настоящего изобретения можно быстро получать сравнительно оптимальную закономерность комплексного регулирования угла поворота нескольких рядов поворотных направляющих лопаток; сократить традиционный процесс определения закономерности угла поворота поворотных направляющих лопаток, в котором применяют оптимизацию фильтрования больших объемов выборки на основе комбинации разных углов между несколькими рядами поворотных направляющих лопаток; эффективно уменьшить затраты ресурсов и времени, связанные с большим количеством вычислений трехмерной CFD-модели в процессе проектирования; уменьшить проектировщикам объем работы, что хорошо подходит для применения в техническом проектировании.

3. Способ установки и способ регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора согласно по меньшей мере одному варианту осуществ-

17

ления настоящего изобретения не ограничиваются только осевым компрессором судовой газовой турбины и равным образом подходят для процесса определения закономерности угла поворота поворотных направляющих лопаток в разных осевых компрессорах промышленных газовых турбин и осевых компрессорах авиационных двигателей, снабженных поворотными направляющими лопатками.

18

Выше приведен только представленный в качестве примера способ осуществления настоящего изобретения, который не предназначен для ограничения объема защиты настоящего изобретения, и объем защиты настоящего изобретения определяется прилагаемой формулой изобретения.

### **Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я**

1. Способ установки угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора, при этом осевой компрессор содержит один ряд или несколько рядов поворотных направляющих лопаток, и на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток предусмотрен один ряд подвижных лопаток, расположенный смежно с этим рядом поворотных направляющих лопаток, отличающийся тем, что:

(1) выбирают характеристическое сечение для расчета угла поворота поворотных направляющих лопаток;

(2) выбирают один ряд поворотных направляющих лопаток и получают аэродинамические параметры в области характеристического сечения подвижных лопаток следующего уровня ряда поворотных направляющих лопаток компрессора в расчетной точке, содержащие: входную осевую скорость  $C_{1a}$ , окружную скорость  $U$ , входной абсолютный угол  $\alpha_1$  потока и входной относительный угол  $\beta_1$  потока;

(3) на основе приведенной скорости  $n'$  компрессора в нерасчетном режиме и приведенной скорости  $n$  компрессора в расчетной точке вычисляют окружную скорость  $U'$  подвижных лопаток при таких приведенных скоростях;

(4) задают приведенную интенсивность  $G'$  потока, ожидаемо достигаемую путем регулирования поворота ряда поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости  $n'$ ; на основе приведенной интенсивности  $G'$  потока и приведенной интенсивности  $G$  потока в компрессоре в расчетной точке вычисляют входную осевую скорость  $C_{1a}'$  подвижных лопаток при такой приведенной скорости;

(5) задают ожидаемый входной угол  $i$  атаки подвижных лопаток следующего уровня, получаемый путем регулирования поворота ряда поворотных направляющих лопаток, и на основе ожидаемого входного угла  $i$  атаки получают входной относительный угол  $\beta_1'$  потока подвижных лопаток следующего уровня после поворота поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости; на основе окружной скорости  $U'$  подвижных лопаток, входной осевой скорости  $C_{1a}'$  подвижных лопаток и входного относительного угла  $\beta_1'$  потока подвижных лопаток при приведенной скорости вычисляют входной абсолютный угол  $\alpha_1'$  потока подвижных лопаток после поворота поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости и находят угол  $\Delta\alpha$  вращения ряда поворотных направляющих лопаток при такой приведенной скорости  $n'$ .

19

2. Способ по п. 1, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что: согласно этапам (1)-(5) вычисляют угол вращения для каждого ряда поворотных направляющих лопаток.

3. Способ по п. 2, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что задают несколько дополнительных приведенных скоростей, отличающихся от приведенной скорости; и вычисляют угол вращения соответственно для каждого ряда поворотных направляющих лопаток согласно этапам (1)-(5) при каждой дополнительной приведенной скорости.

4. Способ по п. 1, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что: аэродинамические параметры в области характеристического сечения подвижных лопаток следующего уровня  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток компрессора в расчетной точке содержат: входную осевую скорость  $C_{1a,j}$ , окружную скорость  $U_j$ , входной абсолютный угол  $\alpha_{1,j}$  потока и входной относительный угол  $\beta_{1,j}$  потока;

на основе нижеследующей формулы получают окружную скорость  $U_j'$  подвижных лопаток при приведенной скорости:

$$U_j' = U_j \cdot \frac{n'}{n}.$$

5. Способ по п. 4, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что: на основе нижеследующей формулы получают входную осевую скорость  $C_{1a,j}'$  подвижных лопаток следующего уровня  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости:

$$C_{1a,j}' = \delta_{c,j} C_{1a,j} \cdot \frac{G'}{G},$$

при этом  $\delta_{c,j}$  представляет собой поправочный коэффициент входной осевой скорости подвижных лопаток,  $j$  представляет собой натуральное число.

6. Способ по п. 5, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что: задают ожидаемый входной угол  $i_j$  атаки подвижных лопаток следующего уровня, получаемый путем регулирования поворота  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток, и на основе нижеследующей формулы получают входной относительный угол  $\beta_{1,j}'$  потока подвижных лопаток следующего уровня после поворота  $j$ -го ряда поворотных

20

направляющих лопаток при такой приведенной скорости:

$$\beta_{1,j}' = \beta_{1,j} - i_j.$$

7. Способ по п. 6, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что: согласно окружной скорости  $U_j'$  подвижных лопаток, входной осевой скорости  $C_{1a,j}'$  подвижных лопаток и входному относительному углу  $\beta_{1,j}'$  потока подвижных лопаток при приведенной скорости на основе нижеследующей формулы получают входной абсолютный угол  $\alpha_{1,j}'$  потока подвижных лопаток после поворота поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости:

$$\alpha_{1,j}' = \arctan \left( \frac{C_{1a,j}'}{U_j' - C_{1a,j}' / \tan \beta_{1,j}'} \right).$$

8. Способ по п. 7, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что: на основе нижеследующей формулы получают угол  $\Delta\alpha_j$  вращения  $j$ -го ряда поворотных направляющих лопаток при приведенной скорости  $n'$ :

$$\Delta\alpha_j = \alpha_{1,j}' - \alpha_{1,j}.$$

9. Способ по п. 1, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что: нерасчетный режим представляет собой нижний рабочий режим.

10. Способ регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора, при этом осевой компрессор содержит один ряд или несколько рядов поворотных направляющих лопаток, и на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток смежно расположены один ряд подвижных лопаток, при этом способ включает:

регулирование угла поворота поворотных направляющих лопаток на основе угла вращения поворотных направляющих лопаток, полученного способом по любому из пп. 1-9.

11. Способ по п. 10, о т л и ч а ю щ и й с я тем, что: регулирование угла поворота поворотных направляющих лопаток на основе угла вращения поворотных направляющих лопаток, полученного способом по любому из пп. 1-9, включает:

21

регулирование угла поворота каждого ряда поворотных направляющих лопаток на основе справочной таблицы, при этом справочная таблица содержит несколько разных приведенных скоростей и отношения соответствия для угла поворота каждого ряда поворотных направляющих лопаток; получение угла поворота для каждого ряда поворотных направляющих лопаток компрессора при нескольких разных приведенных скоростях на основе способа по любому из пп. 1-9.

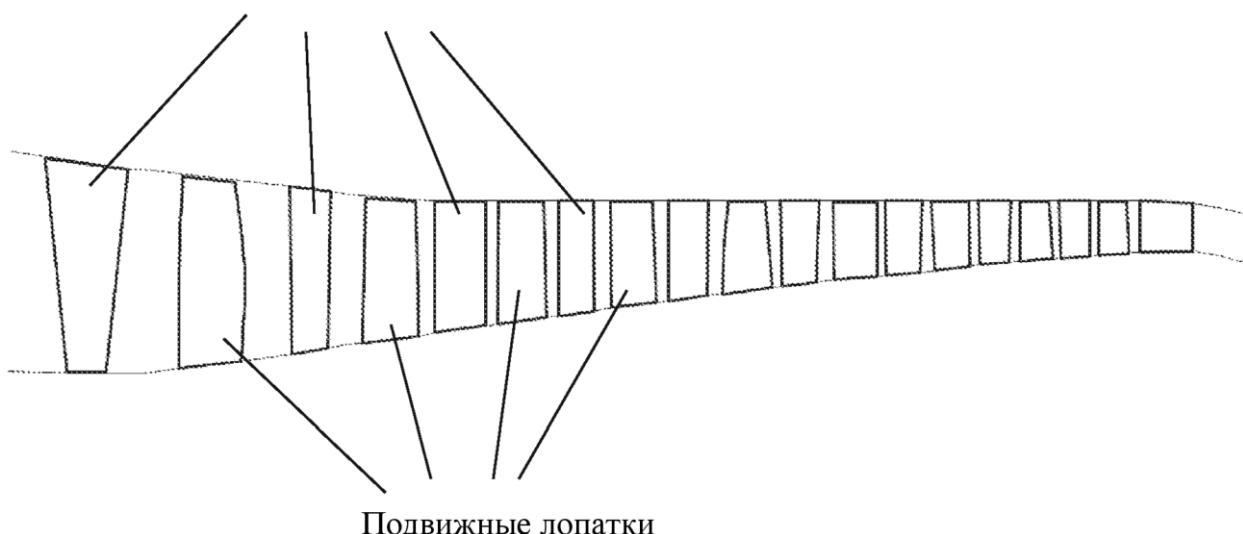
22

12. Осевой компрессор, содержащий один ряд или несколько рядов поворотных направляющих лопаток, при этом на следующем уровне каждого ряда поворотных направляющих лопаток смежно расположены один ряд подвижных лопаток; и управляющее устройство, при этом управляющее устройство выполнено с возможностью регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток осевого компрессора на основе способа по п. 10 или п. 11.

13. Газовая турбина, содержащая осевой компрессор по п. 12.

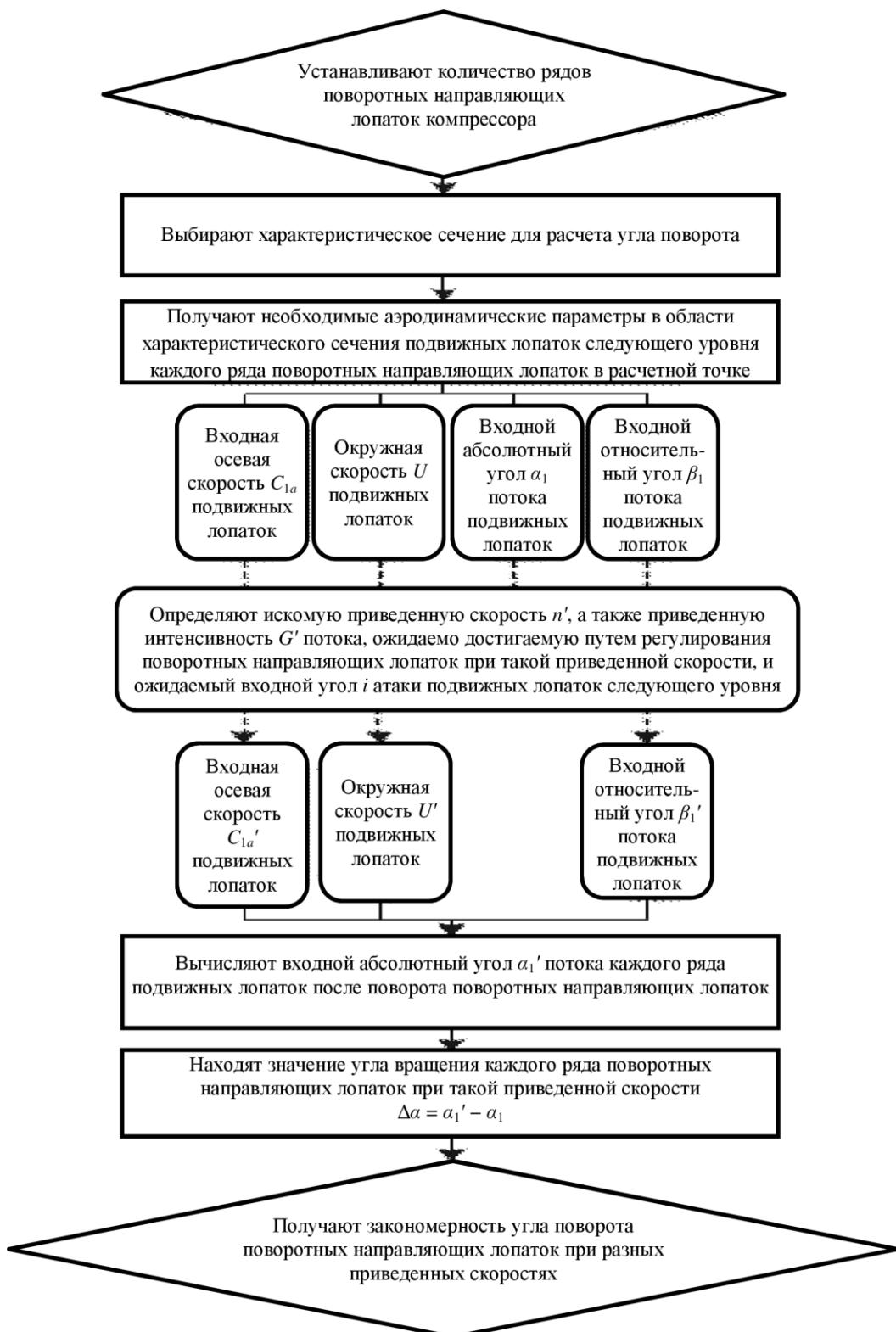
Способ установки и регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток, осевой компрессор и газовая турбина

### Поворотные направляющие лопатки



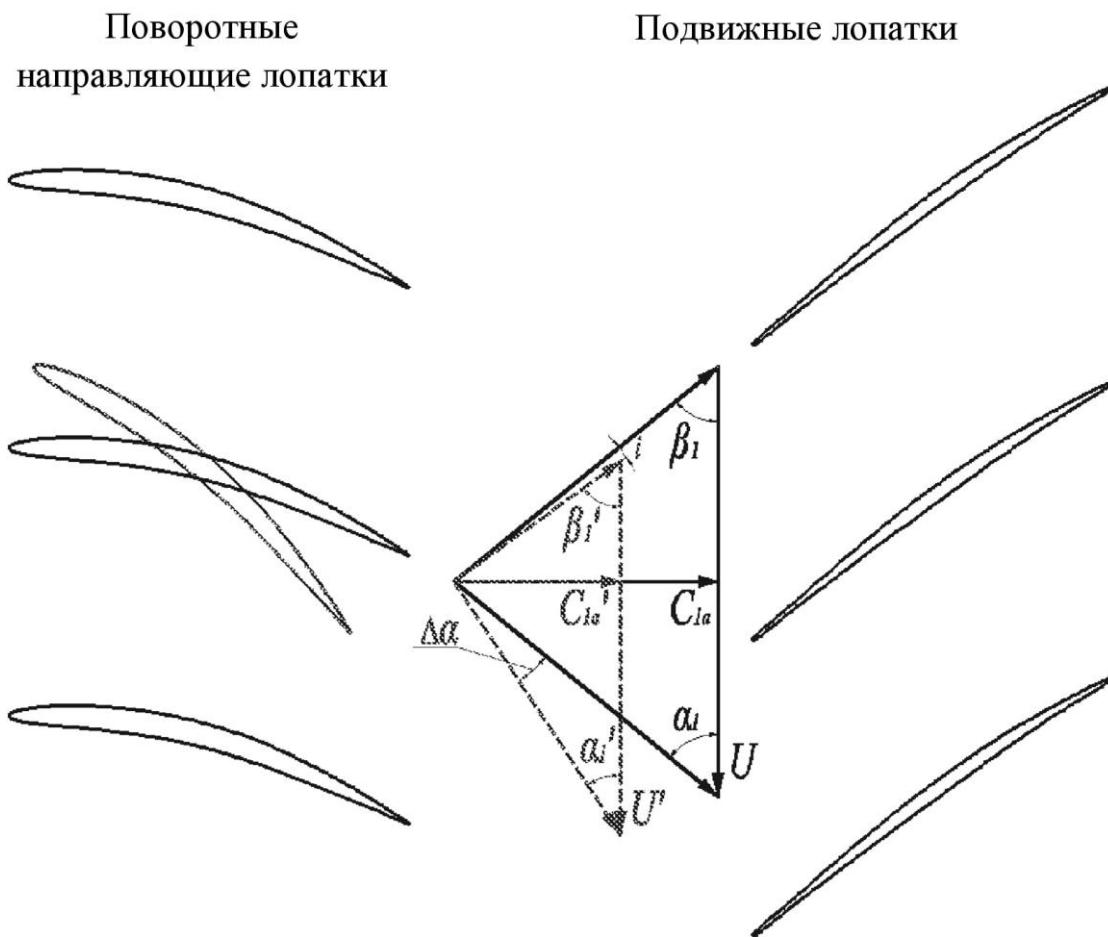
Фиг. 1

Способ установки и регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток, осевой компрессор и газовая турбина



Фиг. 2

Способ установки и регулирования угла поворота поворотных направляющих лопаток, осевой компрессор и газовая турбина



Фиг. 3

Выпущено отделом подготовки официальных изданий