

УДК 532.529

СТЕНДОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Лунев Н.А.

ООО «Техпроект-Сервис», Казань, e-mail: nlunev@yandex.ru

Рассмотрен вопрос создания стенда для моделирования газодинамических процессов в воздухоочистительных устройствах газоперекачивающих агрегатов и газотурбинных электростанций с целью снижения гидравлического сопротивления в всасывающем тракте и обеспечения необходимого качества очистки воздуха от пылевых частиц. В работе приведена технологическая схема стенда, включающая три секции, имитирующие работу воздухоочистительного устройства в условиях природной зоны лесотундра, с возможностью имитации различных условий по влажности, температуре и концентрации пыли. Представлен исследовательский стенд, изготовленный в соответствии с технологической схемой, описаны порядок проведения исследований и методика обработки результатов. Приведена конструкция изобретенного прямооточного циклона и описан ход его испытаний. В заключении дана характеристика проведенного стендового моделирования процессов двухфазной очистки в прямооточном циклоне.

Ключевые слова: газотурбинная установка, воздухоочистительное устройство, прямооточный циклон, имитационное моделирование

STAND MODELING GAS DYNAMIC PROCESSES IN CLEANING AIR DEVICE OF GAS TURBINES

Lunev N.A.

ООО «Tekhproekt-Servis», Kazan, e-mail: nlunev@yandex.ru

The question of creating a stand for the simulation of gas-dynamic processes in the cleaning air devices of gas turbine to reduce the flow resistance in the intake tract and provide the necessary quality of cleaning air from dust particles. A scheme of the stand comprising three sections, cleaning air device simulating operation in a natural zone «forest tundra», with the possibility of simulating different conditions of humidity, temperature and dust concentration. Research presented stand made in accordance with the technological scheme, described the procedure of research and data processing. Shows the design of the straight-flow cyclone invented and described the course of his trial. In conclusion, given the characteristics of the bench held a two-phase cleaning process modeling in a straight-flow cyclone.

Keywords: gas turbine power plant, cleaning air device, straight-flow cyclone, simulation

Стендовое моделирование физических процессов базируется на теории подобия и анализа размерностей. Обязательными требованиями к моделированию физических процессов считаются подобие формы и физическое подобие исследуемой модели и натурального образца, причём значения переменных параметров, определяющих явления, должны быть пропорциональны значениям тех же параметров для натуральных условий. Присутствие такого рода пропорциональности дает возможность осуществлять пересчёт экспериментальных результатов, получаемых для модели, на натуральный образец методом умножения каждого получаемого параметра на определенный множитель — коэффициент подобия. Особый вид моделирования физических процессов заключается в применении устройств, объединяющих физические модели с натуральными образцами. К таким устройствам относятся испытательные и имитационные стенды. В настоящее время существует значительное количество теоретических

работ [1, 6], которые посвящены исследованию физических процессов, протекающих в энергетических и авиационных газотурбинных двигателях (ГТД). В рамках указанных работ проводится большое количество экспериментов для подтверждения выдвигаемых научных гипотез и рабочих параметров ГТД, для чего используют испытательные и экспериментальные стенды разного масштаба и назначения, на которых исследуются как отдельные детали и узлы, так и двигатель в целом.

При этом для обеспечения работы двигателя используется ряд вспомогательных систем, входящих в состав газотурбинной установки (ГТУ) и оказывающих влияние на ключевые параметры ГТД, такие как его коэффициент полезного действия, надежность и т.д. [5]. В этих системах протекают взаимосвязанные процессы разной физической природы, исследование и испытания которых может проводиться как на промышленных образцах, в естественных условиях эксплуатации, так и в стендовых условиях,

с возможностью имитации различных комбинаций как условий внешней среды, так и параметров вспомогательной системы.

Так, для обеспечения ГТУ цикловым воздухом необходимого качества применяется воздухоочистительное устройство (ВОУ), при работе которого, атмосферный воздух очищается от частиц пыли и направляется на вход ГТД. При этом в условиях различных природных зон и разных климатических условий атмосферный воздух может иметь разные плотность, температуру, давление, влажность и массовую концентрацию пыли, которые оказывают влияние на эффективность работы основных элементов ВОУ. Для экспериментального исследования работы ВОУ с имитацией различных внешних условий необходимо обеспечить: подобие массового расхода воздуха, необходимого для работы газотурбинного двигателя и изменение параметров атмосферного воздуха, указанных выше. При этом, с учетом существования различных типов ВОУ [7], в состав имитационного стенда необходимо включить блоки, включающие натурные образцы инерционных пылеуловителей и накопительных воздушных фильтров. Техническое решение такого имитационного стенда представлено на рис. 1 в виде технологической схемы.

Представленное техническое решение имитационного стенда представляет собой комплекс оборудования, состоящего из трёх секций. Секция А предназначена для стендового моделирования условий раз-

личных природных зон и включает в себя три основных устройства: устройство для обеспечения концентрации пыли А2 соответствующее различным природным зонам [7], устройство для распыла или испарения воды А3 с целью повышения влажности воздуха и устройство для повышения температуры воздуха А1. Секция Б предназначена для имитации работы ВОУ любого из трёх типов [7]: инерционного, фильтрующего и инерционно-фильтрующего, что достигается за счёт монтажа или демонтажа универсальных блоков Б3 и Б5 с одинаковыми присоединительными размерами и содержащих натурные образцы воздухоочистительных устройств. Секция Б содержит ряд блоков Б2, Б4 и Б6, которые имеют возможность размещать в тракт стенда различное измерительное оборудование. Также в секцию Б входит имитатор магистрали удаления пыли Б8, присутствующий в ряде ВОУ [4]. Секция В предназначена для имитации работы газотурбинного двигателя в части создания необходимого расхода воздуха с учетом коэффициента подобия.

Одним из вариантов реализации представленного технического решения являлся стенд, разработанный при участии автора и изготовленный в 2005 г. (рис. 2), который в ходе проведенных на нём экспериментов подвергался доводке и доработке. Стенд функционирует до настоящего времени, что позволило исследовать новые воздухоочистительные устройства и их компоненты.

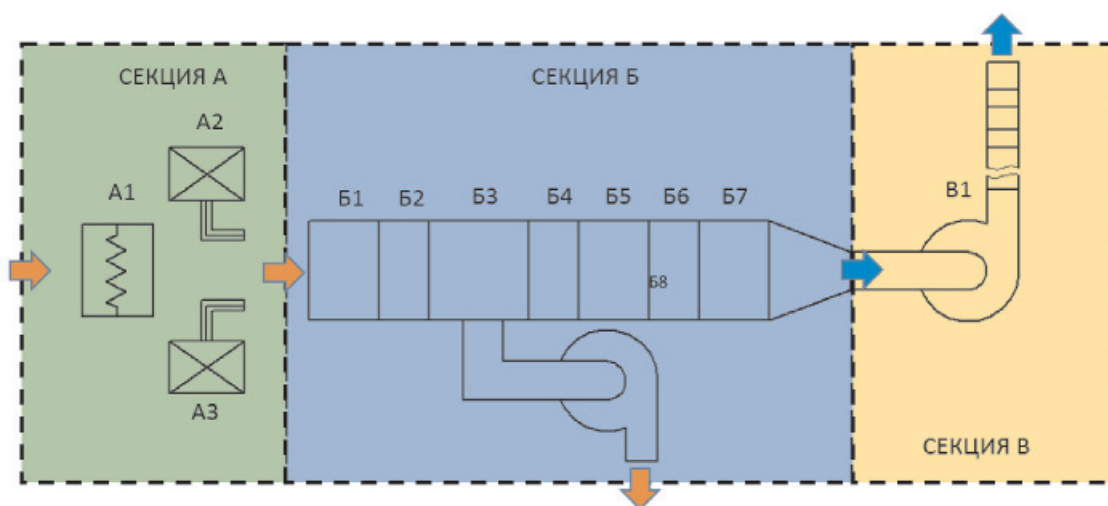


Рис. 1. Технологическая схема испытательного стенда:

А1 – устройство для повышения температуры воздуха; А2 – устройство для обеспечения концентрации пыли; А3 – устройство для распыла или испарения воды;
Секция Б: Б1 – блок подготовки воздуха; Б2, Б4, Б6 – типовые блоки для размещения измерительного оборудования; Б3, Б5 – универсальные блоки для размещения натурных образцов воздухоочистительных устройств; Б7 – блок для отвода очищенного воздуха; Б8 – канал для удаления пыли; В1 – вентилятор для имитации работы газотурбинного двигателя



Рис. 2. Стенд имитации ВОУ

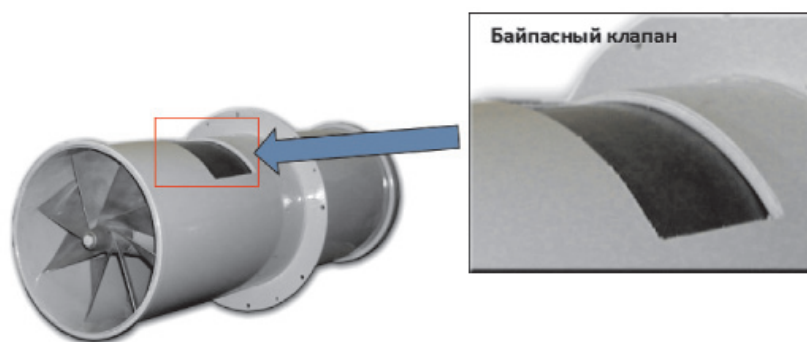


Рис. 3. Прямоточный циклон с байпасным клапаном

В целом представленное техническое решение представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа, предназначенную для стендового моделирования и исследования основных физических процессов, протекающих в ВОУ стационарных ГТУ, например, таких как процесс двухфазного течения запыленного воздуха в устройствах инерционной сепарации пыли, процесс улавливания пыли в фильтрующих материалах, процессы образования и удаления инея на фильтрующих элементах и др. Так, с применением указанного стенда при участии автора был изобретен и запатентован [2, 3] прямоточный циклон с байпасным клапаном (рис. 3), устанавливаемым в циклон для дополнительной подачи воздуха в случае засорения основного входа.

Рассмотрим проведенное исследование процесса очистки в указанном прямоточном циклоне с байпасным клапаном при имитации ГПА эксплуатируемого в условиях лесотундры. Для проведения исследования с целью определения гидравлического сопротивления и эффективности

очистки была выполнена имитация следующих специфических для указанного случая условий: массовая концентрация пыли на входе в стенд $C_{\text{вх}} = 0,12 \text{ мг/м}^3$, расход очищенного воздуха через один прямоточный циклон $G_{\text{ц}}$ в диапазоне от 0,2 до 0,8 кг/с и расход воздуха через канал удаления пыли $G_{\text{отс}} = 0,1 G_{\text{ц}}$.

Подача пыли осуществлялась в секции 1 стенда при помощи специализированного устройства, в которое загружалась кварцевая пыль по ГОСТ 8002–74. При помощи сжатого воздуха и встроенного вентилятора, на выходе из устройства, создавалась струя запыленного воздуха, которая постоянно перемешивалась с окружающим воздухом. В конструкции устройства были предусмотрены регулирующие краны, за счёт которых задавалась концентрация пыли в блоке Б1. Измерение получаемой массовой концентрации пыли осуществлялось при помощи лазерного или фотоэлектрического счётчика частиц, с забором проб в блоке Б2.

Настройка и измерение расхода воздуха осуществлялись в секции 3 при помощи

заслонки и диафрагмы, установленных за центробежным вентилятором В1. Настройка и измерение расхода воздуха, попадающего в канал удаления пыли, производились за вентилятором В9. В блок Б3 устанавливались исследуемые образцы прямооточного циклона, а в блоках Б2 и Б4 – гребенки приёмников полного и статического давления и трубки для осуществления забора проб запыленного воздуха.

При включении вентилятора В1 создавалось разрежение воздуха и в стенд поступал подготовленный в устройстве А2 и блоке Б1 запыленный воздух с необходимой концентрацией пыли, который пропусклся через натурные образцы исследованного прямооточного циклона в блоке Б3, где и производилась инерционная очистка.

При проведении исследований фиксировались и обрабатывались следующие параметры двухфазного потока:

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{изм}} \cdot \frac{288,15}{T_{\text{изм}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{пр}}$ – приведенная температура, К; $T_{\text{изм}}$ – измеренная температура, К;

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{изм}} \cdot \frac{760}{P_{\text{изм}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пр}}$ – приведенное давление, мм рт. ст.; $P_{\text{изм}}$ – измеренное давление, мм рт. ст.

Массовый расход воздуха $G_{\text{осн}}$ через основной воздушный канал определялся при помощи стандартной диафрагмы:

$$G_{\text{осн}} = 1,9724 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{P_{\text{осн}} \cdot \Delta p_{\text{осн}}}{t_{\text{осн}} + 273,15}}, \text{ кг/с}, \quad (3)$$

где $p_{\text{осн}}$ – абсолютное давление перед диафрагмой; $\Delta p_{\text{осн}}$ – перепад давления на диафрагме, $t_{\text{осн}}$ – температура воздуха перед диафрагмой, °С.

При этом

$$p_{\text{осн}} = p_{\text{осн.изб}} + P_{\text{изм}} \cdot 133,32, \text{ Па}, \quad (4)$$

где $p_{\text{осн.изб}}$ – избыточное давление перед диафрагмой.

Массовый расход $G_{\text{отб}}$ через канал удаления пыли определялся также при помощи стандартной диафрагмы:

$$G_{\text{отб}} = 0,2899 \sqrt{\frac{P_{\text{отб}} \cdot \Delta p_{\text{отб}}}{t_{\text{отб}} + 273,15}}, \text{ кг/с}, \quad (5)$$

где $p_{\text{отб}}$ – абсолютное давление перед диафрагмой; $\Delta p_{\text{отб}}$ – перепад давления на диафрагме, $t_{\text{отб}}$ – температура воздуха перед диафрагмой, °С.

При этом

$$p_{\text{отб}} = p_{\text{отб.изб}} + P_{\text{изм}} \cdot 133,22, \text{ Па}. \quad (6)$$

Гидравлическое сопротивление циклона $\Delta p_{\text{ц}}^*$ при различных расходах $G_{\text{осн}}$ определялось как разность между значением давления после блока циклона и перед ним:

$$\Delta p_{\text{ц}}^* = \overline{p_{\text{Б4}}^*} - \overline{p_{\text{Б2}}^*}, \quad (7)$$

где $\overline{p_{\text{Б4}}^*}$ и $\overline{p_{\text{Б2}}^*}$ – средние значения давлений в соответствующих блоках тракта стенда.

Далее на основании полученных значений $\Delta p_{\text{ц}}^*$ при различных расходах воздуха строился график зависимости $\Delta p_{\text{ц}}^* = f(G_{\text{ц}})$, а эффективность очистки циклона определялась путём измерения массовой концентрации частиц $E_{\text{ц}}$ в блоках до циклона $C_{\text{вх}}$ и после него $C_{\text{ц}}$:

$$E_{\text{ц}} = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{ц}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Для снижения погрешности определения каждого параметра его измерение проводилось не менее 7 раз.

Испытания на надежность срабатывания байпасного клапана проводились при помощи специального регулирующего устройства (рис. 4), которое устанавливалось на циклон. При этом моделировалось влияние перекрытия входа на перепад полного давления воздуха $\Delta p_{\text{ц}}^*$, для чего площадь входа перекрывалась в диапазоне от 50 до 100% с шагом 5%.

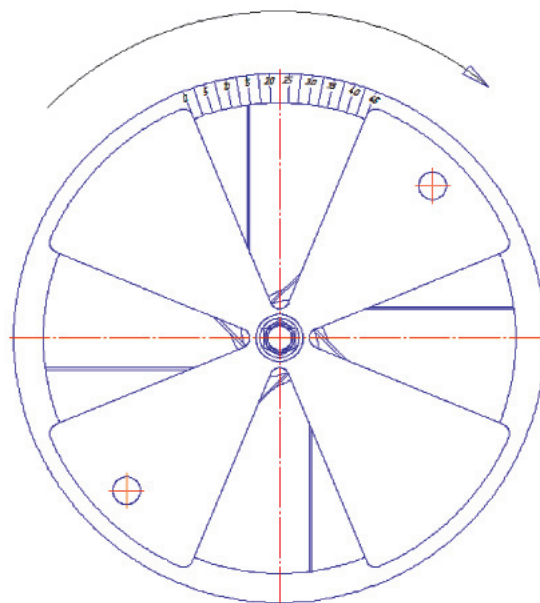


Рис. 4. Устройство для перекрытия входа в циклон

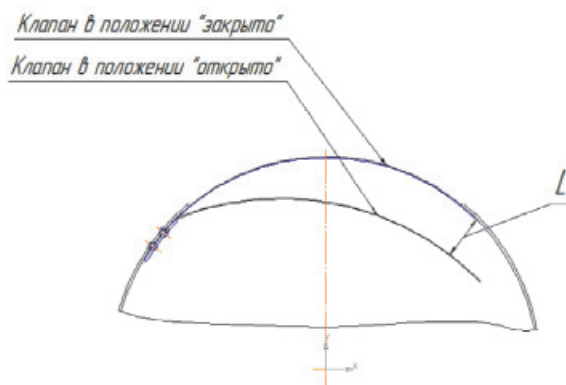
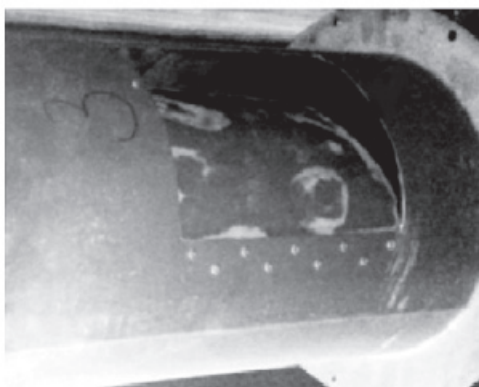


Рис. 5. Байпасный клапан прямооточного циклона

Срабатывание байпасного клапана (рис. 5) происходило сразу при запуске вентилятора В1. При уменьшении площади поперечного сечения входа клапан открывался шире, ширина открытия L увеличивалась, после чего обеспечивался дополнительный подвод воздуха. Проведенный эксперимент позволяет оценить зависимость гидравлического сопротивления прямооточного циклона $\Delta p_{\text{ц}}$ от ширины открытия байпасного клапана L и степени перекрытия входа в циклон и смоделировать работу байпасного клапана в условиях засорения входа в циклон.

Таким образом, моделируя на специализированном стенде работу прямооточных циклонов в составе ГТУ в природной зоне лесотундра, мы можем определить основные параметры исследуемых конструкций прямооточного циклона. При этом стендовое моделирование засорения входа в циклон, при помощи дополнительных приспособлений, позволяет проверить срабатывание байпасного клапана и оценить его влияние на гидравлическое сопротивление циклона.

Список литературы

1. Абдулбасет О.А., Ильников А.В., Щукин А.В. Теплогидравлические характеристики криволинейного канала со сферическими выступами на вогнутой поверхности // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2005. – № 4. – С. 78–79.
2. Кесель Б.А., Воскобойников Д.В., Лунев Н.А. Прямоточный циклон. Патент России № 2240868, Бюл. № 33 от 27.11.2004 г.
3. Кесель Б.А., Понькин В.Н., Воскобойников Д.В., Лунев Н.А. Прямоточный циклон. Патент России № 2361677, Бюл. № 20 от 20.07.2009 г.
4. Лунев Н.А. Расчетно-экспериментальное исследование вопросов предварительной очистки циклового воздуха для стационарных газотурбинных установок // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2010. – № 4. – С. 21–28.
5. Понькин В.Н., Жильцов Е.И., Кесель Б.А., Корноухов А.А. Комплекс технических решений по повышению эффективности ГПА // Газотурбинные технологии. – 2009. – № 2. – С. 18–22.

6. Саттаров А.Г., Лунев А.Н., Семенова С.Г., Хафизов И.Г., Шабалин И.Н. Воспламенение топливной смеси «метан + воздух» лазерным оптическим разрядом // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 16. – С. 187–190.

7. СТО Газпром 2-2.1-226-2008. Технические требования к воздухоочистительным устройствам газоперекачивающих агрегатов. – М.: ООО «Информационно-рекламный центр газовой промышленности», 2008. – 27 с.

References

1. Abdurbaset O.A., Ilnikov A.V., Shhukin A.V. Teplogidravlicheskie karakteristiki krivolinejnogo kanala so sfericheskimi vystupami na vognutoj poverhnosti. Izv. VUZ. Aviatcionnaya Tekhnika, 2005, no. 4, pp. 78–79.
2. Kesel B.A., Voskoboynikov D.V., Lunev N.A. Prjamotochnyj ciklon. Patent of Russian Federation no. 2240868. 27.11.2004, Bulletin no. 33.
3. Kesel B.A., Ponkin V.N., Voskoboynikov D.V., Lunev N.A. Prjamotochnyj ciklon. Patent of Russian Federation no. 2361677. 20.07.2009, Bulletin no. 33.
4. Lunev N.A. Raschetno-jeksperimentalnoe issledovanie voprosov predvaritelnoj oчитки ciklovogo vozduha dlja stacionarnyh gazoturbinnih ustanovok. Vestnik Kazan State Technical University A.N. Tupolev. 2010. no 4. pp. 21–28.
5. Ponkin V.N., Zhilcov E.I., Kesel B.A., Kornouhov A.A. Kompleks tehnikeskikh reshenij po povysheniju jeffektivnosti GPA. Gazoturbinnye tehnologii. 2009. no. 2. pp. 18–22.
6. Sattarov A.G., Lunev A.N., Semenova S.G., Hafizov I.G., Shabalin I.N. Vosplamnenie toplivnoj smesi «metan + vozduh» lazernym opticheskim razrjadom. Vestnik Kazan State Technical University A.N. Tupolev. 2014. vol. 17, no. 16. pp. 187–190.
7. STO Gazprom 2-2.1-226-2008. Tehnicheskie trebovaniya k vozduhoochistitelnyim ustrojstvam gazoperekachivajushhih agregatov. Moscow. ООО «Informacionno-reklamnyj centr gazovoj promyshlennosti», 2008. 27 p.

Рецензенты:

Щукин А.В., д.т.н., профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань;

Михеев Н.И., д.т.н., профессор кафедры реактивных двигателей и энергетических установок, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань.