УДК 621.4

Расчетно-аналитическое исследование воздухозаборного тракта газотурбинной установки ГТЭ-110

И.В. Будаков¹, В.А. Буданов²

¹ «ИНТЕРРАО», г. Москва, Российская Федерация,

² ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: vabudanov@rambler.ru; budakov-iv@ya.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Исследования воздухозаборного тракта газовой турбины ГТЭ-110 в контексте его влияния на ресурс и надежность двигателя ранее не проводились. В связи с неоднократными случаями повреждений двигателей в процессе эксплуатации данные исследования являются актуальными.

Материалы и методы: В качестве основной базы для исследований использованы данные по параметрам работы оборудования и переходным процессам на определенных режимах эксплуатации ГТЭ-110 энергоблоков №1 и №2 Ивановских ПГУ и энергоблока ПГУ №7 Рязанской ГРЭС.

Результаты: Проведен анализ условий работы воздухозаборного тракта ГТЭ-110. Выявлено, что площадь проходного сечения занижена, а величина гидравлического сопротивления тракта больше нормативного значения. Полученные результаты указывают на элементы воздухозаборного тракта ГТЭ-110, которые необходимо усовершенствовать для повышения надежности и ресурса двигателя.

Выводы: Особенности исполнения воздухозаборного тракта могут приводить к отклонению условий работы компрессора от допустимых норм и, как следствие, к работе турбины в неблагоприятных условиях. В связи с этим целесообразно проведение дополнительных исследований, направленных на совершенствование воздухозаборного тракта ГТЭ-110.

Ключевые слова: парогазовая установка, газотурбинная установка, комплексное воздухоочистительное устройство, воздухозаборный тракт, компрессор, теплозвукоизоляционное укрытие, ГТЭ-110, ПГУ-325.

Computational and analytical study of air intake duct of the GTE-110 gas turbine unit

I.V. Budakov¹, V.A. Budanov²

¹Inter RAO, Moscow, Russian Federation

²Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: vabudanov@rambler.ru; budakov-iv@ya.ru

Abstract

Background: The air intake duct of the GTE-110 gas turbine has not been studied yet in terms of its influence on the engine life and reliability. However, repeated instances of engine damage in the process of operation make such study quite relevant.

Materials and methods: The research was mainly based on the data about the equipment operation parameters and the transients in certain GTE-110 unit operation modes of generating units No. 1 and No. 2 of Ivanovo Combined-Cycle Power Plant (CCPP) and CCPP No. 7 of Ryazanskaya GRES (Hydroelectric power plant).

Results: The working conditions of the GTE-110 air intake duct have been studied. It has been revealed that the area of the flow section is smaller and the magnitude of the duct hydraulic resistance is higher than the normative values. The obtained results indicate the elements of the GTE-110 air intake duct, which must be improved to enhance the engine reliability and life.

Conclusions: Air intake duct design characteristics can lead to the deviation of compressor working conditions from the acceptable standards and, as a consequence, to the turbine operation in adverse conditions. Therefore, it is advisable to conduct additional research aimed at improving the GTE-110 air intake duct.

Key words: Combined-cycle power plant, gas turbine, integrated air-cleaning device, air intake duct, compressor, heat and sound insulation cover, GTE-110 (Gas-Turbine-110), PGU-325 (Combined-Cycle Power Plant-325).

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.3.012-019

ГТЭ-110 является уникальной (в отношении мощности к массе) и единственно производимой в России газовой турбины такого класса мощности. В свете последних событий, связанных с санкциями в адрес России, производство и совершенствование ГТЭ-110 становится еще более актуальной задачей.

В процессе внедрения отечественной энергетической газотурбинной установки ГТЭ-110 имели место несколько случаев разрушения рабочих лопаток первой ступени на различных агрегатах. Многие эксперты считают, что подобные аварии связаны с недостат-

ком конструкции двигателя и малым запасом прочности металла лопаток.

Одной из возможных причин, по которым может снижаться надежность и ресурс газотурбинной установки, являются повышенные потери полного давления в воздухозаборном тракте двигателя.

Рассмотрим отдельные элементы воздухозаборного тракта (ВЗТ) ГТЭ-110.

Байпасные клапаны комплексного воздухоочистительного устройства (КБОУ) ГТЭ-110. КБОУ должно обеспечивать заданную степень очистки, малое гидравлическое сопротивление, быть простым и надежным в работе, не требовать больших затрат и чрезмерного обслуживания при эксплуатации, быть удобным для автоматизации и контроля.

Большинство серийных КБОУ оборудованы клапанами, которые выполняют функцию подачи воздуха в ВЗТ при засорении фильтров, т.е. байпасируют поток воздуха. Не так давно отечественные машиностроители устанавливали байпасные клапаны только в выходном конфузоре КБОУ после блока шумоглушения. При такой компоновке байпасирование фильтров КБОУ обеспечивает пропуск воздуха непосредственно во всасывающий трубопровод компрессора. Работу ГТУ при открытых байпасных клапанах допускали только кратковременно, считая это аварийной мерой [1].

В КБОУ ГТЭ-110 клапаны байпасируют только фильтры. Согласно руководству по эксплуатации 097108000 РЭ¹, байпасные клапаны

открываются при повышении разряжения за КБОУ свыше 1,17 кПа. Приведенная величина сильно отличается с рекомендованной в руководстве [1], согласно которому камера фильтров должна иметь байпасное устройство, открывающееся при повышении гидравлического сопротивления КБОУ свыше 70 мм вод. ст. (686 Па).

В одном из случаев заноса фильтров снегом перепад на фильтрах грубой очистки (ФГО) достиг отметки 1,1 кПа (рис. 1). Фильтры тонкой очистки (ФТО) практически имеют перепад давления 0,09–0,14 кПа, суммарный перепад давлений составляет более 1,1. Несмотря на значительное падение давления, байпасные клапаны не открылись. Снизить перепад давления на ФГО удалось лишь локализовав занос фильтров путем их механической чистки с привлечением обслуживающего персонала энергоблока.

Подобные режимы усложняют работу турбины, перегружая ее. АСУТП ГТЭ-110 устанавливает приведенную мощность, ограничивая загрузку турбины в летний период (температура более +15°C), однако расчет эквивалентной мощности двигателя, ограничивающий развиваемую мощность турбины при работе в нестационарных режимах (критических условиях), не производится. В этой связи при наступлении нестационарного режима газовая турбина незаметно для операторов изрядно форсируется.

Рис. 1. График изменения параметров воздуха в КБОУ при обледенении: 1–6 – перепад на фильтрах грубой очистки; 7 – температура воздуха на входе в компрессор; 8 – температура наружного воздуха; 9 – мощность газовой турбины; 10 – температура воздуха за компрессором; 11 – давление воздуха за компрессором; 12 – положение ВНА по УП

¹Газотурбинная энергетическая установка ГТЭ-110 для ПГУ-325. Руководство по эксплуатации. Ч. 1 Описание и работа (097108000 РЭ). – НПК «Зоря»-«Машпроект», 2004.

Например, двигатель управляется регулятором мощности и выдает заданную мощность. Любые нерасчетные режимы и изменения, ухудшающие условия эксплуатации, сказываются на снижении выработки электроэнергии. Тем не менее генерируемая мощность должна оставаться постоянной и меняться только по заданию «Регулятора мощности блока», т.е. соответствовать заданной. Естественно, все факторы, вызывающие снижение выработки электроэнергии, покрываются дополнительной порцией сжигаемого топлива. Если газовая турбина работала с номинальной мощностью, то для сохранения мощности на клеммах генератора при ухудшении условий эксплуатации двигателя форсируется выше номинальной мощности, подрывая свой ресурс. Следует отметить, что, согласно техническим условиям², эквивалентная наработка при увеличении номинальной мощности считается с коэффициентом $k_m = 6$. Выходит, что из-за отсутствия контроля над действительной мощностью двигателя его межремонтный период снижается в 6 раз. Это может являться одной из причин быстрого выхода двигателя из строя.

Воздуховод (ВВ). Предназначен для подвода очищенного циклового воздуха к ГТЭ и снижения до санитарных норм уровня звукового давления, распространяющегося от компрессора через ВЗТ в окружающую среду. Блоки воздуховода имеют идентичную конструкцию и состоят из панелей с теплозвукоизоляцией. Пропускная способность воздухозаборного тракта спроектирована на массовый расход воздуха, равный $G_b = 364$ кг/с. ВЗТ

должен обеспечивать надежную работу ГТУ при температуре наружного воздуха от -40 до $+45$ °С при относительной влажности до 98 % (при $+25$ °С), барометрическом давлении воздуха от 84,0 до 106,7 кПа. Массовый расход воздуха, поступающий в компрессор турбины (при постоянном числе оборотов и открытом положении входного направляющего аппарата (ВНА)), меняется в зависимости от температуры наружного воздуха.

Расход воздуха через компрессор турбины ГТЭ-110 изменяется от $G_b = 397,18$ кг/с (-40 °С) до $G_b = 334,37$ кг/с ($+45$ °С). Расчетный расход воздуха по условиям ИСО 3977-2:1997³ составляет $G_b = 360,83$ кг/с ($+15$ °С) при угле открытия ВНА 0 град. Открытие ВНА до положения 5 град. увеличивает массовый расход воздуха через компрессор до $G_b = 372,15$ кг/с.

Для определения проходного сечения ВЗТ необходимо определиться с объемным расходом воздуха, проходящего через ВЗТ, при этом пропускная способность ВЗТ должна выбираться исходя из максимального объемного расхода при заданной скорости течения потока. На рис. 2 представлен график изменения производительности компрессора в зависимости от температуры воздуха, согласно которому с увеличением температуры массовый расход воздуха падает, однако объемный расход увеличивается. Следовательно, проектировать воздуховод целесообразно из условия максимальной температуры воздуха. Естественно, не будет лишней и корректировка по барометрическому давлению и высоте расположения объекта над уровнем моря.

Рис. 2. График изменения производительности компрессора от температуры воздуха на входе в него (плотность воздуха рассчитывалась с учетом относительной влажности 60 %, атмосферного давления 1,013 бар)

²Технические условия на газотурбинную энергетическую установку ГТЭ-110. 2003 С.39.

³ГОСТ Р 52200-2004 (ИСО 3977-2:1997). Национальный стандарт Российской Федерации: Установки газотурбинные. Нормальные условия и номинальные показатели.

На графике также отражены линейные уравнения, с помощью которых можно с некоторой степенью погрешности определить расход воздуха.

Аналогичные расчеты могут служить подспорьем для диагностики и мониторинга оборудования ГТУ. Например, значение среднегодовой температуры в г. Комсомольск составляет 3,3 °С. Следовательно, среднегодовой расход воздуха при номинальной мощности составит

$$Q_{\text{ср}} = 0,5122 \cdot T + 147,51 = 289 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где T – температура воздуха на входе в компрессор, К.

Величины суммарного пропуск воздуха через фильтры за их эксплуатационный период и перепад давлений на них в дальнейшем можно использовать для прогнозирования периода замены фильтра. Подобный метод более точно покажет дату оптимальной замены фильтров, не рекомендуемую (по часам наработки ГТУ), а фактическую, при которой коэффициент использования будет максимальным.

Другой пример. Максимальная температура воздуха в Ивановской области наблюдается в июле – августе и достигает в отдельные годы +34 – +37°С (абсолютный максимум был зафиксирован на отметке +38°С). На основании наблюдений, объемный расход воздуха при температуре 38°С составляет $Q_v = 306,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Подводя итог, следует отметить, что ВЗТ ГТЭ-110 целесообразно проектировать на объемный расход воздуха $Q_v = 306,8 \text{ м}^3/\text{с}$ при условии, что максимальное открытие ВНА соответствует $\alpha_{\text{ВНА}} = 0^\circ$ (если $\alpha_{\text{ВНА}} = +5^\circ$, то $Q_v = 316,0 \text{ м}^3/\text{с}$). Скорость транспортирования воздуха должна соответствовать рекомендованной скорости (6–18 м/с) [2] (меньшая скорость для более низких температур). Таким образом, площадь проходного сечения ВВ при заданной скорости 10 м/с составит 31 м². Рекомендуемая скорость воздуха перед компрессором составляет 20 м/с. Следовательно, входное сечение для улитки компрессора должно соответствовать значению 15,5 м². В данном случае не следует экономить на металле, поскольку потеря полного давления складывается из сопротивлений по тракту, которые растут с увеличением скорости потока. Несомненно, зауженное сечение ВЗТ ГТЭ-110 вполне объясняется тем, что Генеральному подрядчику, выполняющему работы «под ключ», дешевле соорудить компактный, менее металлоемкий короб, несмотря на то, что заказчик ожидает получить в работу высокоэкономичный энергоблок. Решение спорных моментов кроется в техническом задании. Насколько компетентно проработано техническое задание на проектирование, настолько эффективен результат.

По-видимому, незначительное расхождение пожеланий разработчика и заказчика, наряду с прочими недоработками, внесло свою лепту в формирование запредельно большого разрежения перед входной улиткой компрессора – более 2,85 кПа. Согласно исследованиям (рис. 3), при заданной скорости воздуха $c = 27 \text{ м/с}$ и плотности влажного воздуха $\rho = 1,2198 \text{ кг/м}^3$ динамическое давление составит 445 Па. Следовательно, аэродинамическое сопротивление ВЗТ составляет 2,4 кПа при норме не более 0,98 кПа, притом что параметры воздуха принимались в соответствии с условиями ИСО 3977-2:1997⁴. Увеличение температуры атмосферного воздуха уменьшит его плотность, поэтому поток воздуха ускорится. Следует ожидать роста потери полного давления.

Можно предположить, что расчеты выполнены без учета теплозвукоизоляции коробов. В таком случае эпюры скоростей потока воздуха будут больше, вместе с тем вырастет и динамическое давление.

Для сравнения:

- рекомендуемая скорость воздуха во входном устройстве компрессора (в улитке) 20 м/с;
- динамическое давление 2,85 кПа возникает при течении воздуха по тракту со скоростью 68,5 м/с;
- скорость воздуха перед конфузуром компрессора 80–100 м/с;
- расчетная скорость воздуха за входным конфузуром (перед первой ступенью компрессора) 140,8 м/с.

Таким образом, принимая во внимание высокое разрежение перед улиткой компрессора, можно предположить, что вибрация корпуса и подшипника компрессора ГТЭ-110 есть следствие нерасчетных аэродинамических течений со скоростью в пределах между 27 и 68 м/с. Предположение можно подтвердить (или опровергнуть) лишь проведя натурные исследования.

Сама по себе конструкция ВЗТ эргономична, но вместе с тем имеет ряд не в полной мере понятных конструкторских замыслов. Не совсем четко отслеживается идея установки конфузора (именно такой формы) и вообще целесообразность его наличия. Можно предположить, что таким образом конструкторы хотели равномерно распределить воздушный поток на шумоглушитель либо присутствием дополнительных изменений геометрии короба снизить уровень шума. Чем-то приходится жертвовать, однако оптимальный радиус закругления внутренней кромки короба (рис. 3) следовало бы выполнить в соответствии с рекомендациями⁵ [2, 3].

⁴ ГОСТ Р 52200-2004 (ИСО 3977-2:1997).

⁵ Рекомендации по проектированию газоздушных трактов котельных установок, ЖЗ-57. – М., 1972. – С. 70.

Рис. 3. Поле скоростей по сечению воздуховода при номинальном режиме [11]: 1 – пластины шумоглушения 100 мм; 2 – тоже 200 мм; b – ширина воздуховода; R – оптимальный радиус закругления внутренней кромки короба; индексы $\min$ и $\max$ – минимальная и максимальная ширина конфузора воздуховода соответственно

На рис. 4 представлены две фотографии тепловозвукоизоляционного укрытия (ТЗУ) ГТЭ-110. Оба укрытия идентичны по своей конструкции и различны по организации его вентиляции. В соответствии с проектом, воздух в ТЗУ ГТЭ-110 Стенда должен поступать из ВЗТ ГТЭ-110 через «Перемычку» (рис. 4,а). Идея очень хорошая, однако при проведении пусковых операций высокое разрежение не позволяло запустить газовую турбину, т.е. защита блокировала пуск ГТЭ-110. По всей видимости, это связано с недостаточной площадью проходного сечения ВЗТ и близкого отбора воздуха на «Перемычку» относительно входной улитки компрессора. Впоследствии «Перемычку» демонтировали, тем не менее разрежение воздуха перед улиткой компрессора превышало норму и достигло 300 мм вод. ст. Охлаждение ТЗУ ГТЭ-110 с того времени производилось забором воздуха из главного корпуса. Этот метод распространился на ПГУ-325 (рис. 4,б). В машинном отделении спроектирована общеобменная приточно-вытяжная вентиляция с искусственным и естественным по-

буждением. В отделениях главного корпуса обеспечивается трехкратный (за 1 час) воздухообмен. Приток наружного воздуха осуществляется приточными установками и осевыми вентиляторами. Удаление воздуха из газотурбинного отделения предусматривается за счет забора воздуха на вентиляцию укрытий ГТЭ-110. Удаление воздуха из верхней зоны котельного отделения осуществляется осевыми вентиляторами. Из верхней зоны газотурбинного отделения над каждой газотурбинной установкой предусматривается установка дефлекторов [4]. Однако натурные исследования и опыт эксплуатации показывают, что при работающих газовых турбинах баланс между притоком атмосферного воздуха в здание главного корпуса и его удалением отсутствует [5]. Это связано с тем, что вентиляция ТЗУ ГТЭ-110 осуществляется воздухом из здания главного корпуса. В результате получается, что показания приборов, измеряющих разрежение внутри ВЗТ, имеют отклонение от реальных величин.

Рис. 4. Организация вентиляции тепловозвукоизоляционного укрытия ГТЭ-110: а – атмосферным воздухом (испытательный стенд); б – воздухом из здания главного корпуса (ПГУ-325 блок №1)

Несмотря на недостаточную площадь проходного сечения ВЗТ, воздуховод обильно укомплектован системой шумоглушения. Наряду с шумоизоляционными панелями короба воздуховода установлен блок шумоглушения пластинчатого типа, который имеет две ступени: пластины толщиной 100 мм с шагом 100 мм и пластины толщиной 200 мм с шагом 200 мм, что обеспечивает снижение уровня звукового давления в широком диапазоне. К сожалению, шумопоглотительные кассеты расположены не так красиво, как показано на картинке рис. 3. Поскольку положение ступеней 100 мм и 200 мм не отрегулировано относительно друг друга, то они практически полностью загораживают просвет, а в некоторых местах поток просто ударяется о впереди стоящие пластины. Предположительно, этим достигается значительное снижение шумового давления, но вместе с этим растет перепад давлений на блоке шумоглушения. Он превышает 1,5 кПа (рис. 5).

С учетом генерируемой мощности $N = 109$ МВт и температуры воздуха $t = -15,86$ °C можно предположить, что ВНА прикрыт. Следовательно, значение аэродинамического сопротивления блока шумоглушения, указанное на схеме, не самое высокое.

Естественно, что на каждой плоскости кассеты шумоглушения образовывается пограничный слой и любое резкое изменение траектории потока может вызвать его отрыв. Отрыв потока обусловлен влиянием вязкости, которая уменьшает скорость движения воздуха в пограничном слое и может быть причиной появления обратных токов, оттесняющих поток от стенок и являющихся источником значительных вихревых потерь. Потери на трение при безотрывном течении невелики [6]. Нали-

чие большого количества кассет способно вызвать значительное торможение потока.

Шум. Для ГТУ характерен шум аэродинамического и механического происхождения. Шум аэродинамического происхождения возникает вследствие стационарных и нестационарных процессов в воздухе и продуктах сгорания во всем аэродинамическом тракте от КВОУ до выпуска отработавших газов. Шум работающей турбины значительно меньше, чем шум компрессора, вследствие особенностей газодинамики потока, меньшего числа ступеней и наличия многих препятствий выходящему звуку. В целях снижения уровня шума применяют различные средства на входе и выходе ГТУ. Любое изменение направления течения в тракте от места всасывания воздуха до двигателя способствует ослаблению звука. Котел-утилизатор, располагаемый в выхлопном тракте газовой турбины, снижает не только температуру уходящих газов, но и заглушает шум [7].

В здании главного корпуса шум распространяется от вращающихся механизмов, арматуры (особенно от регулирующих клапанов), труб, коробов. Основное звукоизлучение дает корпус компрессора, причем каждая его ступень возбуждает свои колебания. Высокочастотные колебания обусловлены аэродинамическими возбуждениями.

Эффективными средствами ограничения выхода шума через всасывающий тракт являются: установка в нем экранов из звукопоглощающего материала; звукоизоляция его стенок (особенно изнутри); предупреждение попадания на стенки звуковых волн (прямых или отраженных) [8].

Рис. 5. Мнемосхема ВЗТ ГТЭ-110

Звукопоглощение и звукоизоляция.

При звукопоглощении звуковая энергия преобразуется в тепловую благодаря физико-механическим свойствам материала поглотителя, при звукоизоляции звуковая волна отражается, изменяя направление. Для создания современных шумозащитных конструкций применяют оба способа.

Скорость между звукопоглощающими пластинами достигает 12 м/с (рис. 3). Потеря давления, равная 1,12 кПа, составляет 53 % от полной потери на всасывающем тракте. Мощность установки снижается на 1,9 %, а общий термический КПД – на 1,2 % от применения глушителей шума во всасывающем тракте.

На рис. 6 показан пример установки шумоглушителя во входном устройстве компрессора [9]. Поглотители 3 и 4 установлены таким образом, что их наличие в тракте никоим образом не препятствует движению потока воздуха, чего нельзя сказать об улитке компрессора ГТЭ-110, в которой пакеты шумоглушения выступают внутрь почти на 180 миллиметров.

Рис. 6. Встроенные в патрубок компрессора поглотители шума: 1 – в проточную часть; 2 – эмиссия шума; 3 и 4 – поглотители

Теплозвукоизоляционное укрытие.

Для уменьшения уровня шума и снижения теплового излучения самого ГТЭ-110 применили звукоизоляционные кожухи (укрытие). На фланце патрубка компрессора звуковое давление достигает 155 дБ (А) [9]. Уровень звукового давления, создаваемого турбогруппой ГТУ через стенки корпуса, составляет 100–110 дБ на всех октавах. Снижение шума всасывания до требуемого уровня достигается установкой во входных каналах глушителей, устройства внутренних звукопоглощающих покрытий, аналогичных рис. 6, и пропусканием воздуха через фильтрующий материал.

Шумоизоляция укрытия состоит из слоя поглощающего материала, заключенного между внутренней перфорированной и наружной сплошной металлическими стенками. Удовлетворительные шумовые характеристики получа-

ют без установки глушителей, за счет нескольких поворотов потока и внутренней изоляции тракта.

Заключение

Рассмотренные особенности конструктивного исполнения ВЗТ ГТЭ-110 могут оказывать отрицательное влияние на экономичность, надежность и ресурс двигателя.

В связи с этим целесообразно проведение натурных исследований ВЗТ ГТЭ-110, направленных на определение «слабых мест» и аэродинамическое совершенствование тракта.

Список литературы

1. Михайлов Е.И., Резник В.А., Кринский А.А. Комплексные устройства для энергетических установок. – Л.: Машиностроение, 1978. – 144 с.
2. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). – Л.: Энергия, 1977. – С. 256.
3. Кашников С.П., Цыганов В.Н. Расчет котельных агрегатов в примерах и задачах. – М.; Л., 1951. – С. 239.
4. Пусковой комплекс блока №1 ПГУ-325. Ивановская ГРЭС. Т. 1. – М.: Теплоэлектропроект, 2004. – С. 235.
5. Рабенко В.С., Будаков И.В., Белоусов П.П. Энергосбережение низкотемпературного тепла воздуха теплового укрытия ГТД-110 // Повышение эффективности работы энергосистем: тр. ИГЭУ. Вып. IX. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 51–55.
6. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.
7. Манушин Э.А. Газовые турбины: проблемы и перспективы. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 167 с.
8. Ковалевский М.М. Стационарные ГТУ открытого цикла. – М.: Машиностроение, 1979. – 262 с.
9. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
10. Севастьянова Т.В. Разработка математической модели для имитации работы воздухозаборного тракта ГТЭ-110 Ивановской ГРЭС в программном комплексе Flowvision // Применение газотурбинных установок в энергетике и промышленности: тез. докл. LVI НТК. – Пермь, 2009.

References

1. Mikhaylov, E.I., Reznik, V.A., Krinskiy, A.A. *Kompleksnyye ustroystva dlya energeticheskikh ustanovok* [Integrated devices for power facilities]. Leningrad, Mashinostroyeniye, 1978. 144 p.
2. *Aerodinamicheskiy raschet kotel'nykh ustanovok (normativnyy metod)* [Aerodynamic calculation of boiler units (normative method)]. Leningrad, Energiya, 1977, p. 256.
3. Kashnikov, S.P., Tsyganov, V.N. *Raschet kotel'nykh agregatkh v primerakh i zadachakh* [Calculation of boiler units: examples and problems]. Moscow, Leningrad, 1951, p. 239.
4. *Puskovoy kompleks bloka №1 PGU-325. IVANOVSKAYA GRES* [Starting complex of power unit No. 1 of CCPP-325]. Moscow, Teploelektroproekt, 2004, vol. 1, p. 235.
5. Rabenko, V.S., Budakov, I.V., Belousov, P.P. *Energoberezhenie nizkopotentsial'nogo tepla vozdukha teplovogo ukrytiya GTD-110* [Energy-saving of GTE-110 heat cover air low-grade heat]. *Trudy IGEU «Povysheniye effektivnosti raboty energosistem»* [Collected works of Ivanovo State Power Engineering University «Increasing the efficiency of energy systems»]. Moscow, Energoatomizdat, 2009, vol. IX, pp. 51–55.
6. Nechaev, Yu.N., Fedorov, R.M. *Teoriya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley. Ch. 1* [Theory of aviation gas turbine engines. Part 1]. Moscow, Mashinostroyeniymachinery, 1977. 312 p.
7. Manushin, E.A. *Gazovye turbiny: problemy i perspektivy* [Gas turbines: problems and prospects]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 167 p.

8. Kovalevskiy, M.M. *Statsionarnye GTU otrytogo tsikla* [Stationary open-cycle gas turbine power plants]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1979. 262 p.

9. Ol'khovskiy, G.G. *Energeticheskie gazoturbinnye ustanovki* [Gas turbine power plants]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 304 p.

10. Sevast'yanova, T.V. *Razrabotka matematicheskoy modeli dlya imitatsii raboty vozdukhosbornogo trakta GTE-110 Ivanovskoy GRES v programnom komplekse*

Flowvision [Development of a mathematical model for simulation of the GTE-110 air intake duct of Ivanovo Hydroelectric Power Plant in the software package Flowvision]. *Tezisy dokladov LVI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Primenenie gazoturbinnnykh ustanovok v energetike i promyshlennosti»* [Abstracts of the LVI-th Science and Technology Committee «Application of gas-turbine installations in power engineering and manufacturing industry»]. Perm', 2009.

Будаков Игорь Владимирович,
ОАО «ИнтерРАО»,
кандидат технических наук, главный специалист отдела эксплуатации и экологии,
e-mail: budakov-iv@ya.ru

Буданов Виталий Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин,
e-mail: vabudanov@rambler.ru