

В результате экспонирования и специальной обработки регистрирующей среды фиксируется голограмма, образованная объемной интерференционной структурой в регистрирующей среде. Голограмма во встречных пучках в силу своих избирательных свойств может восстанавливать изображение объекта при освещении ее некогерентным светом, что позволяет проводить анализ полученных интерференционных картин практически в любом помещении без использования лазерных источников излучения.

Опытные образцы приспособлений рамной конструкции для лабораторных испытаний и экспериментального определения жесткостных характеристик методом голографической интерферометрии, как и последующие серийные приспособления, изготовляли методом литья из стали 40ХЛ, имеющей модуль продольной упругости  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа и коэффициент Пуассона  $\nu - 0,2$ . Для получения голографических интерферограмм деформированного состояния опытные образцы приспособлений закрепляли на стендовой плите с Т-образными пазами при помощи специальных болтов М16.

Экспериментальная установка для анализа жесткостных характеристик станочных приспособлений методов голографической интерферометрии, также смонтированная на стендовой плите, позволила провести исследование деформированного состояния различных компоновок в идентичных условиях по одной и той же схеме нагружения. При этом во всех случаях применявшихся в качестве регистрирующей среды фотопластины ПФГ-03 закрепляли непосредственно на объекте исследования, что позволяло однозначно нейтрализовать различные трансляционные смещения, неизбежно возникающие в экспериментах прикладываемых нагрузок выбирали как при экстремальных режимах резания на оснащаемых данными приспособлениями станках, но в пределах, обеспечивающих получение качественных интерференционных картин, поддающихся расшифровке и анализу.

Проведенная по разработанной методике серия экспериментов позволила получить голографические интерферограммы деформированного состояния приспособлений рамной конструкции, обладающие количественной информацией о распределении перемещений точек данного объекта под воздействием рабочих усилий. Полученные величины относительных деформаций и абсолютных смещений характеризуют жесткость исследуемых конструкций приспособлений и возможность достижения требуемой точности обработки деталей на оснащаемых металлорежущих станках.

Визуальный анализ показывает, что картины деформирования исследуемых базовых поверхностей соответствуют реальной схеме нагружения и закрепления приспособлений: максимум перемещений наблюдается в верхней (незакрепленной) части при их стремлении к нулю внизу (в зоне заделки).

Список литературы: 1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. -М.: Мир, 1975, с.273с. 2. Голографические неразрушающие исследования. // Под редакцией Р.К.Эрфа. - М.: Машиностроение, 1985, -245с.

*Поступила в редколлегию 15.05.2008*

**УДК 621.438:621.045.042**

*С.О. БЕЛЯЕВА, В.А. КОВАЛЬ*

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОВАЗОВЫХ УСТАНОВОК**

The possibility of a raise of effectiveness stem-gas an engine installation due to rational injection of water in the setting of the axial-flow compressor is considered. Experimentally effect of injection of water in different places its input in the compressor is explored at various operational modes and rotational displacement of stators.

В условиях широкого применения ГТУ в энергетике большую актуальность приобретает поиск оптимальных схем энергоустановок с газовыми турбинами, имеющих максимально возможный КПД и высокую удельную мощность. Указанные параметры в значительной степени определяют сравнительную рентабельность новых энергоустановок.

Характерным для всех типов современных ГТД является повышение параметров цикла (температуры и давления газов), что создает предпосылки для снижения надежности машины и ухудшения ее экологических характеристик. Поэтому особое внимание уделяется проектированию основных узлов двигателя с учетом особенностей протекания в них рабочих процессов.

Хорошими показателями в плане повышения тепловой эффективности при одновременном снижении удельной стоимости обладают энергоустановки, работающие по газопаровым циклам, где в качестве дополнительного рабочего тела используется водяной пар, генерируемый в процессе утилизации тепла отработанных газов и впрыскиваемый в камеру сгорания (цикл STIG). Одним из вариантов энергоустановок такого типа, предназначенных для замещения выходящих из эксплуатации энергоблоков ТЭЦ, является установка МЭС-60 на базе ГТД АЛ-21 разработки ФГУП «ММПШ «Салют».

При разработках ПГУ с применением конверсионных ГТД предполагается, что основные параметры и конструкция компрессорной группы исходного прототипа авиадвигателя существенно не изменяется. Это позволяет значительно сократить капитальные затраты.

Основными путями повышения термического КПД энергоблоков с ГТУ являются: снижение относительной мощности компрессора, которая, как правило, в 1,5...2,5 раза превышает полезную мощность на валу электрогенератора и утилизация или регенерация тепла выхлопных газов. Характерная особенность известных схем ПГУ с впрыском пара – достаточно жесткая связь доли использованного при регенерации тепла отработанных в ГТ газов и параметров парового контура. При этом в схеме ПГУ с впрыском пара

необходимость его применения при давлении  $p_s$ , равном или даже существенно превышающем давление компримированного воздуха, определяет повышенный уровень температуры кипения воды, что заметно сказывается на возможности предельной регенерации тепла отработанных газов.

Большой интерес для перспективных схем ГТУ представляют технические решения, направленные на снижение относительной мощности компрессора. При этом чаще всего используется промежуточное охлаждение воздуха между компрессорами низкого и высокого давления. Конструктивно это существенно увеличивает габариты компактных конверсионных машин и требует существенного изменения их конструкции. Поэтому, в этом случае целесообразно использовать впрыск воды в компрессор для снижения температуры рабочего тела и, следовательно, уменьшением удельной работы сжатия, что и приводит к уменьшению мощности компрессора и к росту эффективного КПД установки и ее мощности.

Организация впрыска воды в компрессор (ВВК) дает возможность заменить воздушное охлаждение лопаточного аппарата турбины более эффективным паровоздушным для повышения температуры газа перед турбиной при той же температуре материала лопаток и (или) повышения ресурса элементов высокотемпературного тракта ГТУ снижением температуры лопаток и дисков.

Следует отметить, что результаты расчетов компрессоров с различными геометрическими параметрами при впрыске воды в проточную часть (ВВПЧ) показывают существенное отличие в них процессов движения и испарения влаги и влияния впрыска на показатели работы компрессора. Среди факторов, вызывающих эти отличия, отметим такие, как размеры проточной части компрессора, место ввода воды, степень повышения давления компрессора, количество впрыскиваемой воды и др. Заметим, что впрыск дает положительные результаты лишь при учете этих факторов. Вариантные расчеты позволяют определить условия оптимального впрыска, после чего необходимы экспериментальные исследования его влияния на показатели конкретных газотурбинных и парогазовых установок.

В связи со сказанным выше основной целью работы явилось определение эффективного КПД компрессора, работающего на увлажненном воздухе, и выработка рекомендаций по выбору оптимальной схемы впрыска воды в осевой компрессор ПГУ МЭС-60, выполненной на базе газогенератора авиационного ГТД АЛ-21Ф3. При этом экспериментальные исследования выполнены на стенде Ц-3 НИЦ ЦИАМ, совместно с ФГУП ММП «Салют».

Эффективный КПД компрессора вычислялся по формуле

$$\eta_{эф}^* = \frac{\frac{k}{k-1} RT_{ex}^* \left( \pi_k^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{C_p (T_{вых}^* - T_{ex}^*) + r \delta G_L G_e}, \quad (1)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования;  $T_{ex}^*$ ,  $T_{вых}^*$  – температуры на входе и выходе из компрессора;  $G_e$  – расход воздуха;  $C_p$  – теплоемкость.

Для расчетной оценки влияния ВВПЧ на характеристики ПГУ был разработана упрощенная программа при следующих основных допущениях:

- одномерная и равновесная постановка задачи;
- впрыскивается такое количество жидкости, чтобы влажность воздуха в месте впрыска соответствовала состоянию насыщения. Таким образом, оценивается максимальная эффективность впрыска при наличии однофазного рабочего тела.

В основу расчетного метода исследования влияния ВВПЧ на характеристики компрессора, границу устойчивой работы при изменении углов установки направляющих аппаратов положен алгоритм программного комплекса "ХАРИКА", разработанный в ЦИАМ. Для решения поставленной задачи программный комплекс был адаптирован применительно к процессам сжатия воздуха при следующих допущениях:

- впрыск воды производится перед компрессором во входном канале;
- испарение жидкости происходит полностью, фазовый переход начинается в первой и завершается в последней ступени компрессора;
- закон испарения воды вдоль проточной части компрессора – линейный;
- испарение жидкости осуществляется в межвенцовых зазорах каждой ступени мгновенно;
- наличие воды и ее испарение не оказывают влияние на обобщенные характеристики компрессорных ступеней.

Результаты расчетных исследований с помощью адаптированной программы показали, что испарение впрыскиваемой жидкости на вход в компрессор в количестве  $GL = 2,5\%$  от расхода воздуха существенно повышает КПД компрессора (ожидаемый выигрыш составляет  $\delta\eta^*_{эф} = 7...10\%$ ) (рис.1).

Смещение напорных характеристик, вызываемое впрыском воды в проточную часть компрессора, при штатной программе регулирования в значительной степени зависит от приведенной частоты вращения ротора. По мере ее роста увеличивается выигрыш в степени повышения давления, который при  $\bar{n}_{пр} = 0,893$  достигает значения  $\delta\pi^*_k \approx 15\%$ .

Наибольшее приращение расхода воздуха, составляющее  $\delta G_v$  при  $\approx 5\%$ , ожидается в диапазоне частот вращения ротора  $\bar{n}_{пр} = 0,80...0,86$ .

Отклонение от штатной программы регулирования углов установки лопаток группы первых ступеней в сторону их раскрытия обеспечивает дополнительный выигрыш по расходу воздуха при одновременном повышении КПД компрессора в области  $\bar{n}_{пр} < 0,8$  и его снижению при  $\bar{n}_{пр} \geq 0,8$ .

Изменение углов установки направляющих аппаратов группы последних ступеней компрессора дает дополнительный положительный эффект при

$\bar{n}_{пр} \leq 0,8$ . В этом случае прогнозируется получение выигрыша по расходу воздуха при одновременном повышении КПД компрессора с отклонением от штатной программы регулирования в сторону раскрытия указанных лопаток.

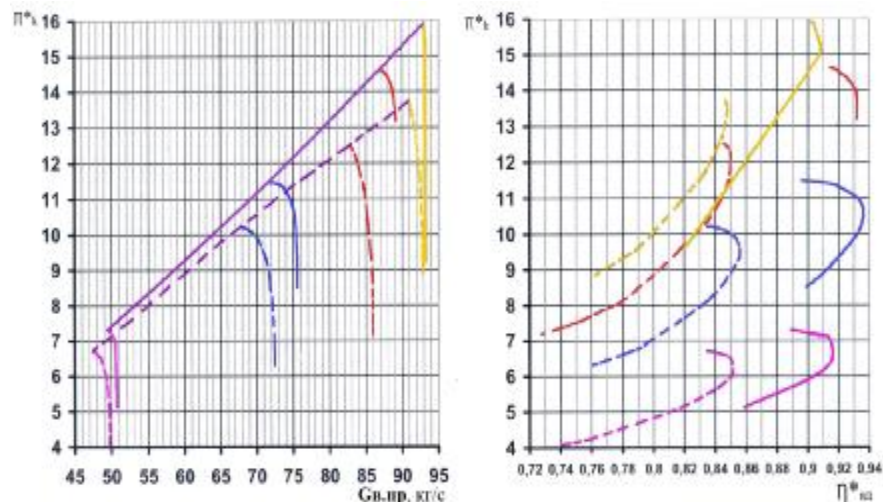


Рис. 1 – Влияние впрыска воды на характеристики компрессора, регулируемого по штатной программе в пределах  $\bar{n}_{пр} = 0,72 \dots 0,893$ : - - - - GBL = 0; —  $\delta GBL = 0,025$ .

В общем случае для впрыска воды в проточную часть 14 ступенчатого компрессора использовались три независимых варианта подачи жидкости

Первый вариант предусматривал ВВПЧ через входной коллектор, расположенный на расстоянии 1,5 метра от компрессора.

Второй вариант предусматривал ВВПЧ через форсунки в НА-3 и НА-8, через каждую вторую лопатку с помощью шести тангенциальных форсунок, расположенных в три яруса по высоте лопатки, на каждом ярусе по одной форсунке на спинке и на корытце лопатки.

При третьем варианте впрыск воды осуществлялся через втулочную часть ротора при помощи 12 струйных форсунок. В этой схеме была предусмотрена возможность включения разного количества и сочетания форсунок с регулируемой подачей воды по каждой из магистралей.

Сравнительная оценка эффективности различных способов ВВПЧ компрессора показана на рис.2.

Влияние впрыска воды через лопатки НА-3 на суммарные характеристики компрессора качественно идентично тому, которое было отмечено в случае подачи воды во входной канал. Однако очевидным преимуществом подачи воды через лопатки НА-3 является отсутствие

повышенных гидравлических потерь во входном канале и необходимости отбирать сжатый воздух из проточной части компрессора для подачи в форсунки.

При впрыске воды через лопатки НА-8 в связи с неполным испарением воды в пределах проточной части компрессора положительные эффекты оказались существенно слабее, чем при подаче воды во входной канал и через лопатки НА-3.

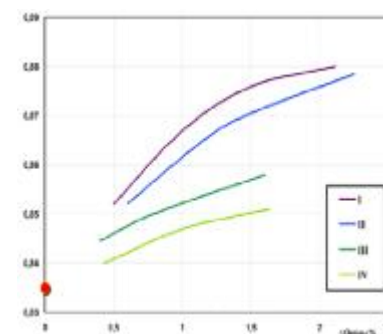


Рис. 2 –Изменение эффективного КПД компрессора ПГУ МЭС-60 от количества ВВПЧ при  $p_k^* = 11$ : верхняя линия (I) - впрыск в НА-3; следующая (II) – впрыск на входе; III – подача в ротор через 4,5,6,7,9 и 10 РК; нижняя IV -впрыск НА-8

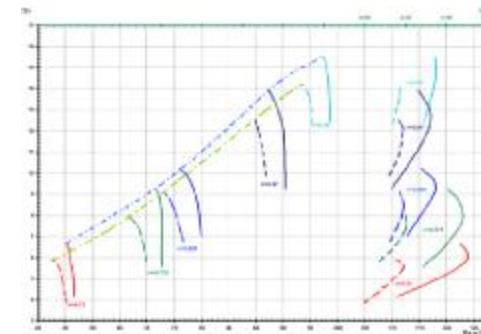


Рис. 3 – Экспериментальные характеристики компрессора МЭС-60 при ВВПЧ в НА-3 ( $\delta G_v = 1,5\%$ );  $\Delta \alpha_{вх} = \text{var}$ : - - - - без впрыска воды; — впрыск воды

Как показали результаты эксперимента, эффективность роторного впрыска воды через рабочие колеса 4,5,6,7, 9 и 10 ступеней в направлении перпендикулярному основному потоку значительно ниже, чем аналогичный впрыск через НА 3 ступени и во входной канал.

При взаимодействии воды и воздуха происходит снижение температуры образующейся смеси, вследствие чего увеличивается приведенная частота вращения ротора компрессора, преимущественно его последних ступеней. При этом их напорные характеристики смещаются в сторону увеличения расхода воздуха и степени повышения давления (рис.3). Количественно этот эффект зависит от исходного согласования ступеней машины. Так, при максимальных значениях приведенных частот вращения ротора (в этом случае наибольшая производительность компрессора по расходу воздуха определяется «запиранием» межлопаточных каналов его первых ступеней) впрыск воды не вызывает увеличение расхода воздуха. Однако при этом может быть получен существенный выигрыш по напору, т.е. по запасу газодинамической устойчивости.

В ходе эксперимента было исследовано влияние на характеристики компрессора углов установки поворотных направляющих аппаратов выходной группы ступеней (8-12) в широком диапазоне приведенных частот вращения ротора  $\bar{n}$  при  $\bar{n} = 0,72 \div 0,87$ . Лопатки направляющих аппаратов выходной группы последовательно устанавливались в положения, соответствующие их проектным углам ( $\Delta\vartheta = 0^\circ$ ) и прикрытию на  $\Delta\vartheta = -3^\circ$  и  $\Delta\vartheta = -5^\circ$ .

На всех исследованных частотах вращения прикрытия выходных аппаратов без впрыска воды приводит к снижению запасов устойчивости – особенно при  $\Delta\vartheta = -5^\circ$ . Впрыск воды через лопатки НА-3 ступени в пределах  $\delta GL \approx 1,5\%$  значительно повышает запасы устойчивости.

Поскольку организация равномерного по сечению впрыска воды на входе в компрессор связана со значительным загромаждением и большими гидравлическими потерями, на завершающем этапе эксперимента проводилась проверка эффективности впрыска при более простой схеме подачи ее из форсунок, расположенных на стенке входного канала.

Результаты сравнительного эксперимента показали, что эффективный КПД компрессора при таком впрыске практически совпадает со значениями КПД, полученными при впрыске через все 30 форсунок.

Следует отметить, что экспериментальные данные достаточно хорошо коррелируются как с предварительными расчетными оценками ВВПЧ в разных ее местах, так и с данными, полученными другими авторами, например, приведенных в работе [1]. Расчетные исследования параметров однофазной энергетической установки ГТ-009, разработанной и серийно выпускаемой компанией «Энергомаш (ЮК) Лимитед», также подтвердили факт существенной зависимости КПД компрессора от места ВВПЧ. Авторами работы [1] установлено, что максимальное влияние на КПД и степени повышения давления компрессора оказывает впрыск воды в третью ступень 13 ступенчатого компрессора. Отмечено, что эффективность впрыска воды перед компрессором ниже вследствие интенсивной сепарации капель на корпусе машины. За третьей ступенью эффективность ВВПЧ снижается из-за уменьшения времени пребывания воды в компрессоре и окончания процесса сжатия воздуха.

Полученные результаты исследований позволили разработчикам ПГУ МЭС-60 выбрать вариант организации впрыска воды в НА-3, что позволило на 6% увеличить КПД компрессора с одновременным ростом давления в цикле и расхода рабочего тела.

Список литературы: 1. Расчетные исследования параметров работы энергетической газотурбинной установки ГТ-009 с впрыском воды в компрессор/ Ю.М. Ануров, А.Ю. Пеганов, А.В. Скворцов, А.Л. Беркович и др. //Компрессорная техника и пневматика. – 2006.- №7.- С.32-33.

*Поступила в редакцию 15.05.2008*

**УДК 621.923**

*С.М. БРАТАН, Е.А. ВЛАДЕЦКАЯ*

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ЧЕРЕЗ ФУНДАМЕНТ СТАНКА, НА КАЧЕСТВО ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ**

Analysis of influence of vibrations transferable through foundation of machine-tool on quality of polishing process

Современное развитие машиностроения сопровождается повышением мощности и скоростных характеристик машин при одновременном возрастании их надежности и точности. Для этого необходимо повышение точности изготовления детали, улучшение геометрических и физико-механических свойств их поверхностного слоя, определяющее эксплуатационные характеристики машин. Геометрические погрешности, в частности волнистость обрабатываемой поверхности, существенно влияют на контактную жесткость, износостойкость, герметичность соединений, шум и др [1].

Одним из путей повышения качества обработки деталей является ослабление вынужденных колебаний станка, передаваемых через фундамент от внешних источников. Уровень вынужденных колебаний станка снижается при установке станка на виброизолирующие устройства и фундаменты. Виброизоляция станков должна быть более тщательной на заключительных операциях, в частности, при шлифовании.

При этом необходимо выполнение нескольких этапов анализа и синтеза. На первом этапе производится анализ формирования точности обработки, на втором – анализируются вибрационные воздействия подсистем и элементов станка на процесс шлифования. Третий этап предусматривает оценку вибрационных воздействий внешнего оборудования (например, грузочно-разгрузочного устройства) на технологическую систему станка. На четвертом этапе выполняется морфологический анализ виброизолирующих устройств базовых деталей станка, на пятом – структурно-компоновочный синтез рациональных вариантов виброизолирующих устройств. Шестой этап – параметрический синтез рациональных конструкций виброизолирующих устройств, седьмой – оценка уровня проведенных работ по критерию повышения точности процесса шлифования. В случае отсутствия положительного результата следует возвратиться к четвертому этапу и повторить процедуры анализа и синтеза (четвертый, пятый и шестой этапы), а если результат положительный, то процесс переводят в стадию практической реализации синтезированных рациональных вариантов виброизолирующих устройств. Графическая интерпретация вышеприведенной методологии представлена на рисунке 1.