

УДК 621.438

**А. В. СМИРНОВ, А. Н. ЩЕДРЕНКОВ, О. Н. ЩЕРБАКОВ, А. Ю. КАРУЦКИЙ,
В. П. ПАРАФЕЙНИК**

ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе», г. Сумы, Украина

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ВЫХЛОПНЫХ ТРАКТАХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ С ГАЗОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ ДУ80Л1

В работе представлены результаты численного исследования течения газа в двух вариантах выхлопных трактов с газоходами прямоугольного и круглого сечения для газоперекачивающих агрегатов типа ГПА-Ц-25С с приводом на базе газотурбинного двигателя ДУ80Л1. В результате исследований было определено суммарное сопротивление указанных выхлопных трактов, а также выполнен анализ потерь давления и структуры течения в его элементах. По результатам анализа полученных данных были определены направления дальнейших расчетных и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование проточной части выхлопных трактов.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, газотурбинный привод, выхлопной тракт, газоотводное устройство, численное исследование, гидравлическое сопротивление, зоны возвратных течений.

Введение

В настоящее время на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов преимущественное применение получили газоперекачивающие агрегаты (ГПА) с газотурбинным приводом (ГТП).

Как показывает опыт создания блочно-контейнерных и блочно-модульных ГПА, конструкция выхлопного тракта (ВТ) агрегата оказывает существенное влияние на энергетические, проектно-конструкторские и экологические характеристики агрегатов и КС, создаваемых на их основе. Это обусловлено следующими факторами:

гидравлические потери в ВТ оказывают существенное влияние на эффективность ГТП в составе агрегата;

конструкция ВТ определяет компоновочную схему ГПА и межагрегатные расстояния на площадке КС и, следовательно, ее схему;

конструкция ВТ существенно влияет на экологическую обстановку в районе КС, т.к. газотурбинный двигатель (ГТД) является источником химического, акустического и теплового загрязнения окружающей среды.

Таким образом, совершенствование ВТ является разноплановой и весьма актуальной научно-технической задачей.

Учитывая ограниченные возможности настоящей публикации и особую актуальность задачи повышения к.п.д. ГТП, т.е. снижения энергозатрат на транспортировку газа, в настоящей работе представлены результаты

расчетно-исследовательских и конструкторских работ, посвященных созданию более эффективного ВТ для агрегатов типа ГПА-Ц-25С, создаваемых на основе ГТД судового типа ДУ80Л1 конструкции ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев).

Как известно, одним из факторов, определяющих эффективность работы ГПА с ГТП, является величина гидравлического сопротивления ВТ. Снижение потерь в ВТ увеличивает срабатываемый на свободной турбине перепад давления, что повышает экономичность агрегата. Согласно [1] снижение потерь полного давления в выхлопном тракте на 1000 Па приводит к увеличению к.п.д. ГТП примерно на 1%.

В настоящем исследовании на основе численного анализа особенностей течения выхлопных газов ГТД в проточной части ВТ обоснована его новая, конструктивная схема для блочно-модульных ГПА — более эффективная по уровню гидравлических потерь, более технологичная в производстве и имеющая меньшие массогабаритные характеристики.

1. Состояние вопроса

Исследованию течений в элементах ВТ ГТД посвящено большое количество работ. В [1] проанализирован вклад элементов ВТ ГПА в блочно-контейнерном исполнении в суммарное сопротивление ВТ. Согласно представленным данным 75% потерь давления приходится на осерадиальный диффузор, 15 — 20% на сборную камеру, а остальные — на потери в переход-

ном диффузоре и шумоглушителе. Авторами также представлены результаты модельных испытаний различных вариантов улиток для ГТД НК-12СТ и НК-16СТ, отличавшихся геометрией осерадиальных диффузоров и сборных камер. В результате исследования были сформулированы рекомендации по выбору степени раскрытия осерадиального диффузора и его относительной длины. В [2] представлены основные требования, предъявляемые к ВТ, подходы к его проектированию, а также результаты модельных испытаний газоотводных устройств коленного и улиточного типа. Авторы достигли снижения потерь полного давления за счет установки системы дефлекторов в проточную часть газоотводных устройств. В [3] приведены экспериментальные исследования осерадиальных диффузоров выхлопных патрубков ГТД с различными геометрическими характеристиками. В [4] представлены результаты модельных испытаний газоотводного устройства коленного типа. Авторами исследовалось влияние кривизны средней линии газоотвода, а также длины отводящего патрубка на его сопротивление. В результате были получены рекомендации по выбору длины патрубка, устанавливаемого за моделью в зависимости от относительного радиуса кривизны средней линии газоотводного устройства.

Большой вклад газоотводных устройств в суммарное сопротивление ВТ обусловило повышенное внимание к исследованию их эффективности, в то время как проектирование всех последующих элементов в лучшем случае осуществлялось с учетом простейших рекомендаций [5], не учитывающих особенностей течения на выходе из газоотводных устройств, а также взаимного влияния элементов ВТ. На практике такой подход зачастую приводит к ухудшению характеристик элементов ВТ и снижению прогнозируемого уровня потерь.

Исключением может считаться работа [6], в которой представлены результаты модельных исследований улитки совместной с ВТ для агрегатов типа ГПА-Ц-6,3 в блочно-контейнерном исполнении. Кроме аэродинамического совершенства автор затрагивает важную проблему термо- и вибропрочности выхлопной шахты и акцентирует внимание на том, что разрушения в ВТ возникают из-за сильных вибраций, обусловленных развитыми отрывными течениями. С целью уменьшения вибрации в существующей выхлопной системе и снижения потерь давления в ней, автором были проведены модельные испытания ВТ в компоновке «улитка – диффузор – шумоглушитель». Улучшение аэродинамической эффективности ВТ было достигнуто при снижении скорости на выходе

из осерадиального диффузора улитки за счет увеличения степени его раскрытия, а также за счет применения диффузора выхлопа с эквивалентным углом раскрытия 22° и ступенькой на выходе из него, обеспечивающей устойчивый отрыв потока, благодаря чему вибрации не передавались на стенки диффузора. Для уменьшения эквивалентного угла раскрытия в диффузоре были установлены перегородки, разделяющие его на каналы с меньшими углами раскрытия.

В последнее время более широкое применение находят ГПА в индивидуальных укрытиях ангарного типа. Их основным преимуществом является удобство эксплуатации и обслуживания, что особенно важно для регионов с суровыми климатическими условиями. Ввиду особенностей компоновки агрегатов ангарного типа их ВТ имеют горизонтальный и вертикальный участки. Это неизбежно приводит к увеличению гидравлических потерь по сравнению с ВТ ГПА в блочно-контейнерном исполнении. Поэтому вопрос аэродинамического совершенства ВТ для ГПА ангарного типа особенно актуален. Однако в известной литературе информация по исследованиям ВТ ГПА ангарного типа не представлена.

Традиционно при доводке ВТ использовались экспериментальные методы. Это обуславливало большие объемы испытаний, увеличение сроков и стоимости опытно-конструкторских работ. Однако в настоящее время появилась возможность детального моделирования физических процессов средствами вычислительной гидрогазодинамики, которые позволяют относительно оперативно по сравнению с физическим экспериментом получить информацию по газодинамической эффективности исследуемых объектов.

2. Объект исследования

На рис. 1 представлена схема ВТ производства ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе» (далее ПАО).

ВТ состоит из улитки 1, горизонтального и вертикального участков, соединенных с помощью газоотвода 8. Горизонтальный участок состоит из системы диффузоров 1-й и 2-й ступени (3 и 6, соответственно), а также компенсаторов 2, 5, 8 и проставок 4, 7. Система диффузоров предназначена для уменьшения скорости потока выхлопных газов с целью снижения потерь полного давления, а также обеспечения рекомендуемой скорости потока в каналах шумоглушителя (не более 30 м/с). Длина горизонтального участка составила 13,3 м, площадь проходного сечения ВТ перед газоотводом 16 м^2 . Вертикальный участок

состоит из проставки 10, шумоглушителя выхлопа 11, который снижает уровень шума ГТД до пределов, соответствующих санитарным нормам, переходника 12, предназначенного для перехода ВТ с прямоугольного сечения на круглое, выхлопной трубы 13 для отвода выхлопных газов в атмосферу на высоту, обеспечивающую их рассеивание до предельно допустимой концентрации и зонта 14, предназначенного для защиты проточной части ВТ от атмосферных осадков. Высота ВТ от нулевой отметки до среза выхлопной трубы составляет 25 метров.

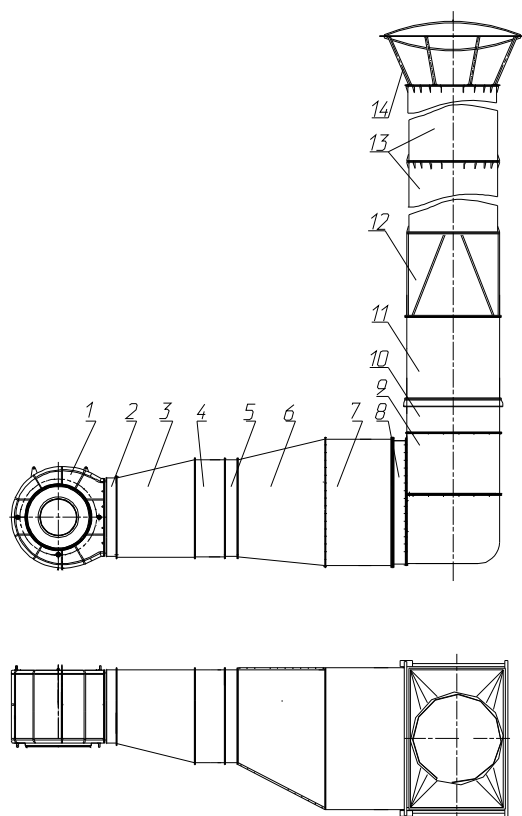


Рис. 1. Конструктивная схема существующего выхлопного тракта агрегата ГПА-Ц-25-С:

- 1 – улитка, 2 – компенсатор 1-й ступени,
- 3 – диффузор 1-й ступени, 4 – переходник 1-й ступени,
- 5 – компенсатор 2-й ступени,
- 6 – диффузор 2-й ступени, 7 – проставка,
- 8 – компенсатор 3-й ступени, 9 – газоотвод,
- 10 – проставка, 11 – шумоглушитель,
- 12 – переходник, 13 – труба выхлопа, 14 – зонт

В ГПА производства ПАО используются ВТ с газоходами прямоугольного сечения, применение которых имеет следующие недостатки:

Сложность и трудоемкость изготовления из-за большого количества сварных швов.

Коэффициент запаса прочности сварных швов ниже, чем у основного металла газоходов. К тому же сварные швы представляют собой

концентраторы напряжений, что снижает надежность конструкции.

В результате температурных расширений в углах блоков ВТ возникают зоны повышенных напряжений, что также негативно сказывается на надежности ВТ.

Одним из способов борьбы с указанными недостатками может стать применение ВТ с газоходами круглого сечения. Возможным препятствием для его применения могут быть увеличенные габаритные размеры блоков (по сравнению с ВТ с газоходами прямоугольного сечения), которые в свою очередь ограничиваются предельными транспортными габаритами.

Исходя из вышесказанного, целью данной работы была разработка конструкции ВТ с газоходами круглого сечения, которая обеспечивала бы приемлемый уровень потерь и соответствовала требованиям транспортного габарита.

3. Методика численного моделирования

Численное исследование выполнено с помощью программного комплекса ANSYS CFX.

Расчеты были выполнены с использованием тетраэдрических сеток, созданных с помощью сеточного генератора ANSYS Meshing. Количество элементов сетки для рассчитанных вариантов составило ~18 млн. элементов.

Учитывая большие значения суммарного коэффициента избытка воздуха и стехиометрического коэффициента в камере сгорания двигателя ДУ80Л1, отличие свойств выхлопных газов от свойств воздуха не учитывалось.

Расчеты были выполнены для номинального режима работы ГТД. Течение на входе в ВТ принималось равномерным, направленным по нормали к входному сечению улитки. В качестве граничных условий на входе в улитку задавались массовый расход воздуха $\dot{m} = 87$ кг/с и его статическая температура $t = 480$ °С; на выходе – граничное условие типа Opening с нулевым избыточным давлением. Течение принималось адиабатическим; на внутренних поверхностях стенок задавалось граничное условие «прилипания». Расчеты были выполнены с использованием k-ε модели турбулентности.

4. Анализ полученных результатов

Прежде всего было исследовано течение в существующей конструкции ВТ с газоходами прямоугольного сечения.

Согласно результатам расчетов потери полного давления в ВТ составили 2178 Па, из которых 1151 Па составляют потери в улитке, 606 Па – на горизонтальном участке, 172 Па – в поворотном газоотводе, 96 Па – в шумоглуши-

теле, 153 Па – в конфузорном переходнике и выхлопной трубе.

С точки зрения величины гидравлических потерь существующая конструкция ВТ удовлетворяет требованиям, выдвигаемым производителем ГТД. Однако анализ структуры течения выявил ряд недостатков существующей конструкции и возможных путей ее усовершенствования.

На рис. 2 представлены линии тока в исходном варианте ВТ. Из рис. 2 видно, что характер течения в ВТ имеет сложную пространственную структуру со множеством вихревых зон и зон обратного течения. Неравномерность течения выхлопных газов в ВТ приводит к повышению гидравлических

потерь, ухудшению шумовых характеристик, а также, что очень важно, к значительному по амплитуде колебанию давления в нем, что в свою очередь создает динамические нагрузки на конструктивные элементы ВТ и может привести к их разрушению.

Неравномерность течения в ВТ, прежде всего, связана с особенностями структуры течения на выходе из улитки. Как видно из рисунка 3а, течение на выходе из улитки обладает симметричной закруткой, которая возникает в результате поворота потока, натекающего на обечайку улитки после выхода из осерадиального диффузора (рис. 3б). Эта закрутка сохраняется до выходного сечения улитки и распространяется вниз по течению вплоть до газоотвода.

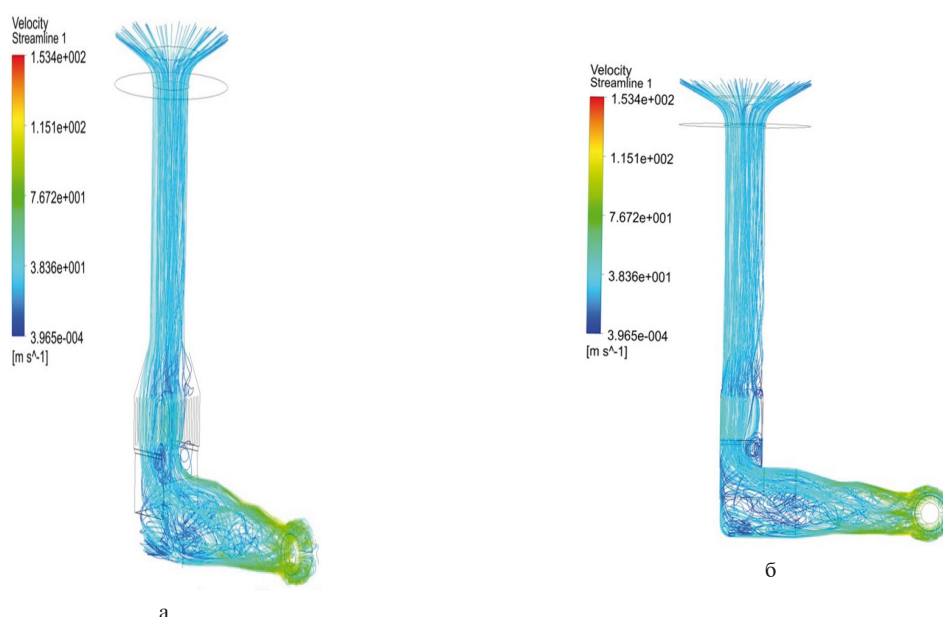


Рис. 2. Линии тока в выхлопном тракте агрегата типа ГПА-Ц-25С:
а – пространственное отображение; б – вид со стороны ГТД

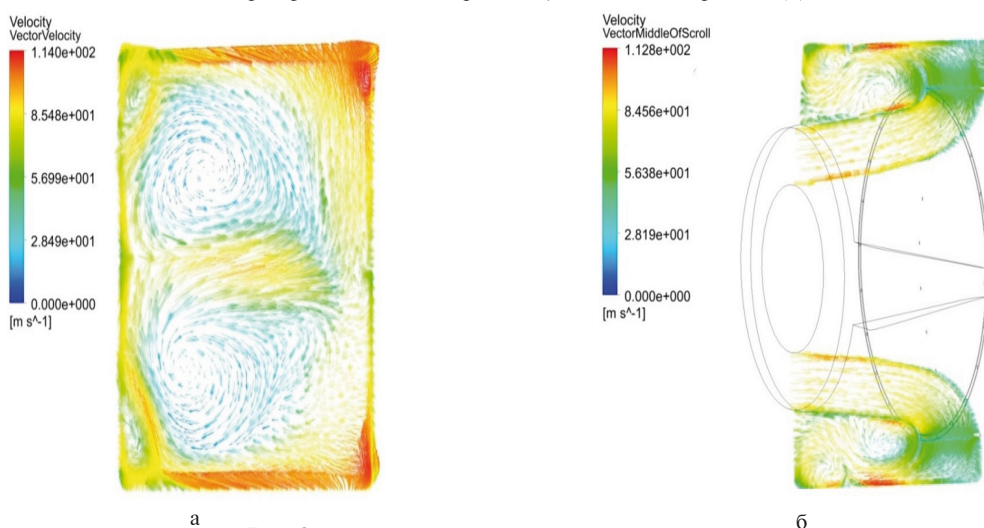


Рис. 3. Особенности поля скоростей в улитке ВТ:
а – векторы скорости в выходном сечении улитки; б – векторы скорости в среднем сечении улитки

Результаты расчета показали также, что из-за больших углов раскрытия диффузоров первой и второй ступеней (24° и 27°, соответственно) на горизонтальном участке ВТ возникают зоны отрывных и возвратных течений. Кроме того, обширные зоны возвратных течений были обнаружены и на участке поворота. Возникновение зон возвратных течений, помимо

повышения гидравлического сопротивления и увеличения динамических нагрузок на элементы ВТ также негативно сказывается на работе шумоглушителя, поскольку приводит к тому, что скорости потока с внешней стороны газоотвода превышают рекомендуемые 30 м/с. На рис. 4 представлены заливки скорости в характерных сечениях шумоглушителя.

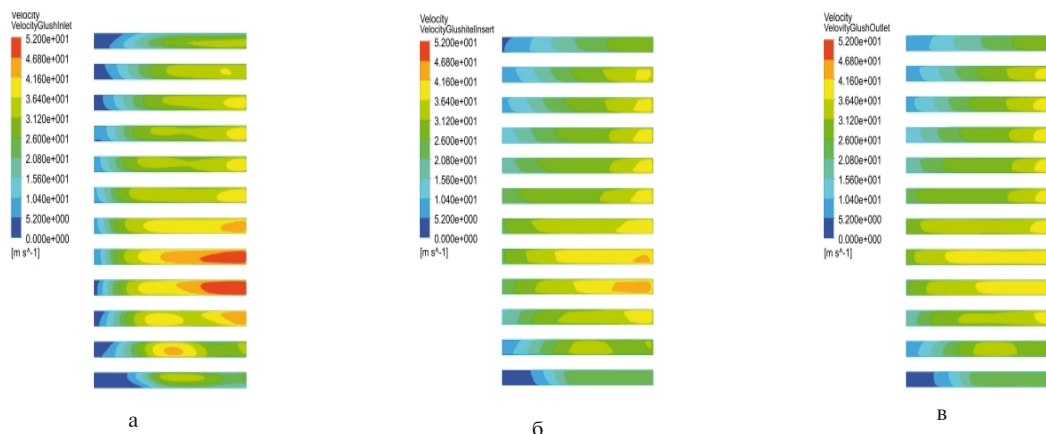


Рис. 4. Заливки скорости в шумоглушителе исходной конструкции выхлопного тракта: а – вход в шумоглушитель; б – среднее сечение шумоглушителя; в – выходное сечение шумоглушителя

Выявленные в процессе исследования недостатки были учтены при разработке новой конструкции ВТ с газоходами круглого сечения. Особое внимание при этом было уделено выбору степени диффузорности элементов ВТ, при которой обеспечивается плавное торможение потока перед шумоглушителем.

В частности, для предотвращения отрыва потока на горизонтальном участке ВТ была разработана конструкция диффузорного переходника с переходом от прямоугольного сечения на круглое с отношением площадей входа к выходу $F_{\text{ВЫХ}}/F_{\text{ВХ}}=1,12$.

Для снижения потерь на вихреобразование при повороте потока на 90° в соответствии с рекомендациями [7] была разработана конструкция диффузорного поворотного колена с отношением площадей входа к выходу $F_{\text{ВЫХ}}/F_{\text{ВХ}}=1,7$, размеры которого не превышают предельные транспортные габариты.

Для обеспечения требуемого уровня скоростей потока на входе в шумоглушитель, перед ним был установлен конический диффузор с углом раскрытия 23°. Принятое значение угла раскрытия превышает рекомендуемые в литературе значения [5, 7], однако, применение диффузора с меньшим углом раскрытия привело бы к существенному увеличению его длины, что в свою очередь увеличило бы размеры и металлоемкость опорных конструкций ВТ и ужесточило требования к фундаменту.

На рис. 5 представлена конструктивная схема вновь разработанного ВТ с газоходами круглого сечения.

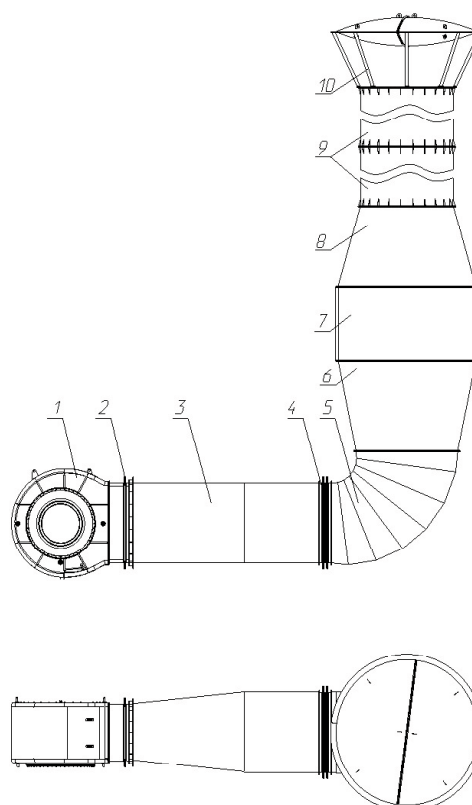


Рис. 5. Конструктивная схема разработанного ВТ с газоходами круглого сечения:

- 1 – улитка, 2 – компенсатор 1-й ступени,
- 3 – переходник, 4 – компенсатор 2-й ступени,
- 5 – газоотвод, 6 – диффузор, 7 – шумоглушитель выхлопа, 8 – конфузор, 9 – труба выхлопа, 10 – зонт

Горизонтальный участок ВТ состоит из улитки 1, компенсатора 1-й ступени 2, предназначенного для компенсации температурных расширений, переходника 3, предназначенного для перехода ВТ с прямоугольного сечения на круглое, компенсатора 2-й ступени 4, колена 5, предназначенного для поворота потока на 90°. Длина горизонтального участка ВТ составила 10,8 м, площадь проходного сечения на входе в колено 4,6 м². Вертикальный участок ВТ состоит из диффузора 6, шумоглушителя 7, конфузора 8, трубы выхлопной 9 и зонта 10. Высота разработанного ВТ равна высоте ВТ с газоходами прямоугольного сечения и составляет 25 м.

Как показал анализ отказ от громоздкой системы диффузоров и распределение диффузорности по всем элементам ВТ позволил уменьшить габариты и сократить металлоемкость конструкции на 21%. Как показали результаты расчетов, гидравлическое сопротивление вновь разработанного варианта ВТ составило 1987 Па, что на 8,3% ниже по сравнению с сопротивлением существующей конструкцией.

Информация о потерях полного давления в элементах исходного и разработанного вариантов ВТ представлена в таблице 1. Согласно представленным данным снижение сопротивления ВТ было достигнуто за счет снижения потерь на горизонтальном участке и в поворотном колене.

Таблица 1

Потери полного давления в элементах выхлопного тракта

	Суммарные потери в ВТ Δp_{Σ}^* , Па	Потери в улитке $\Delta p_{ул}^*$, Па	Потери на горизонтальном участке $\Delta p_{г}^*$, Па	Потери в поворотном колене $\Delta p_{к}^*$, Па	Потери в шумоглушителе $\Delta p_{ш}^*$, Па	Потери в выхлопной трубе $\Delta p_{тр}^*$, Па
ВТ с газоходами прямоугольного сечения	2178	1151	606	172	96	153
ВТ с газоходами круглого сечения	1987	1198	374	138	107	170

На рис. 6 представлены линии тока в разработанном варианте ВТ. Как видно из рисунка, течение в новом варианте ВТ более равномерное, отсутствуют отрывные зоны на горизонтальном участке и на внешней стороне поворотного колена, что и объясняет снижение сопротивления в данных элементах. В тоже

время в диффузоре, установленном на вертикальном участке перед шумоглушителем, обнаружена обширная зона возвратного течения.

Возникновение зоны возвратного течения в диффузоре связано с большим значением угла раскрытия диффузора (23°) и неравномерностью потока на выходе из поворотного колена.

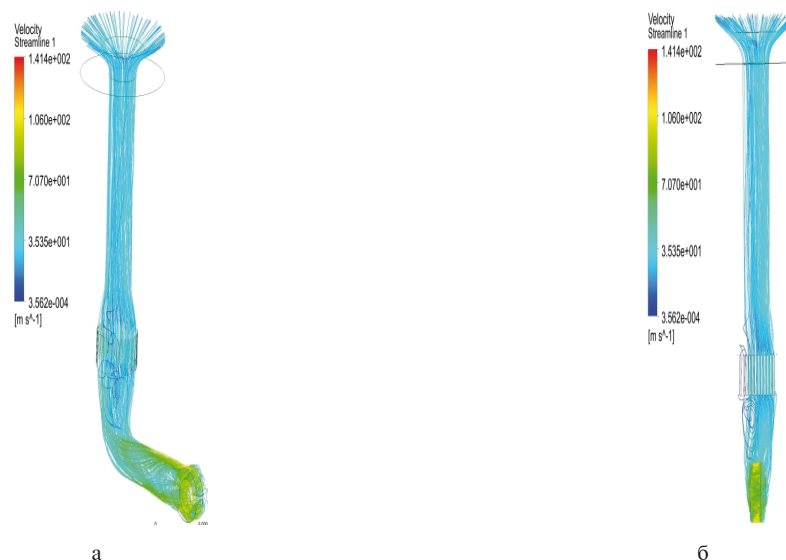


Рис. 6. Линии тока в выхлопном тракте с газоходами круглого сечения: а – пространственное отображение; б – вид со стороны ГТД

Отличительной особенностью обнаруженной отрывной зоны является то, что она расположена не со стороны внутренней поверхности поворотного колена, а повернута на 90° в сторону

ГТД. Данное явление, по-видимому, связано с неравномерностью течения на выходе из горизонтального участка, которая обусловлена характером течения на выходе из улитки.

Образование зоны возвратного течения в диффузоре приводит к тому, что в шумоглушителе образуются участки, на которых скорости потока превышают 30 м/с (рис. 7). Для предот-

вращения этого требуется доработка конструкции диффузора и поворотного колена с целью обеспечения безотрывного течения.

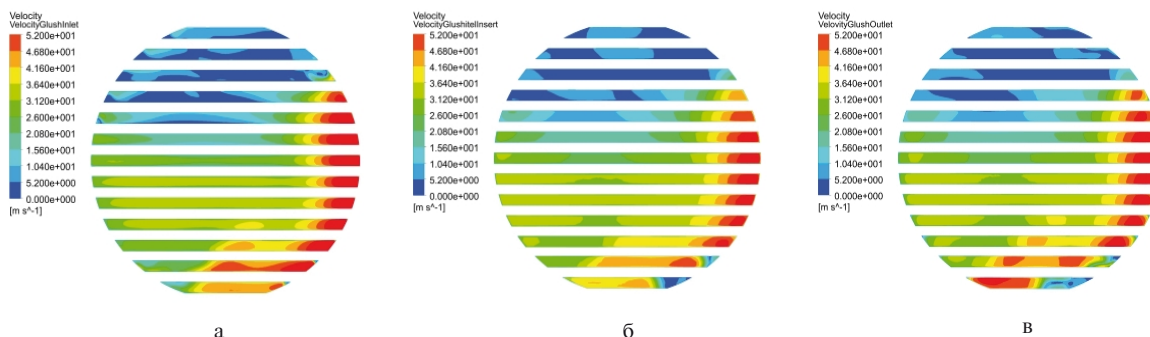


Рис. 7. Заливки скорости в шумоглушителе нового варианта выхлопного тракта:

а – вход в шумоглушитель; б – среднее сечение шумоглушителя; в – выходное сечение шумоглушителя

Заключение

По результатам численного исследования была разработана конструктивная схема ВТ с газоходами круглого сечения для агрегатов типа ГПА-Ц-25С в ангарном укрытии на базе двигателя ДУ80Л1, позволяющая уменьшить неравномерность течения выхлопных газов, снизить потери в ВТ на 8,3%, а также уменьшить габаритные размеры и сократить металлоемкость конструкции на 21%.

Дальнейшие расчетные и экспериментальные исследования целесообразно осуществить с целью:

- снижения неравномерности потока на выходе из улитки;
- повышения эффективности шумоглушения в ВТ за счет обеспечения равномерного течения выхлопных газов на входе в шумоглушитель;
- определения распределения температуры выхлопных газов и поверхностей элементов ВТ с учетом теплообмена с окружающей средой;
- верификации результатов численного исследования путем сравнения с результатами экспериментальных исследований моделей ВТ и натурных испытаний в условиях КС;
- проверки посредством численного моделирования термонапряженного и вибрационного состояния разработанного варианта ВТ при рабочих условиях.

Литература

1. Апанасенко А. И. Монтаж, испытания и эксплуатация газоперекачивающих агрегатов в

блочно-контейнерном исполнении А. И. Апанасенко, Н. Г. Крившич, Н. Д. Федоренко – Л.: Недра, 1991 – 361 с.

2. Бородин Ю. А. Воздухоприемные и газоотводные устройства судовых газотурбинных установок [Текст] / Ю. А. Бородин, А. А. Вимба, Н. Я. Магусевич, С. И. Нахамкин, - Л.: Судостроение 1969 – 170 с.

3. Мигай В. К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин [Текст] / В. К. Мигай, Э. И. Гудков – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1981 – 272 с.

4. Вершковский С. Н. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик моделей коленообразного газоотвода газотурбинного двигателя [Текст] / С. Н. Вершковский, А. В. Котов // Авиационно-космическая техника и технология – 2012. – №7 – С. 81-84.

5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик - М.: Машиностроение, 1992 – 672 с.

6. Соколов С. Г. Газоперекачивающие агрегаты с авиаприводом и способы повышения их эффективности [Текст]: дис. канд. техн. наук. 05.04.06 / Соколовский Сергей Григорьевич. – М., 1984 – 126 с.

7. Дейч М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин [Текст] / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин – М.: Энергия, 1970 – 384 с.

Поступила в редакцию 19.06.2015

**А.В. Смірнов, А.М. Щедренков, О.М. Щербаков, А.Ю. Каруцький, В.П. Парафійник.
Чисельне дослідження течії газу у вихлопних трактах газоперекачувальних агрегатів
з газотурбінним приводом на базі двигуна ДУ80Л1**

У роботі представлені результати чисельних досліджень течії газу в двох варіантах вихлопних трактів з газоходами прямокутного та круглого перетину для газоперекачувальних агрегатів ГПА-Ц-25С з приводом на базі газотурбінного двигуна ДУ80Л1. У результаті досліджень було визначено сумарний опір вказаних вихлопних трактів, а також проаналізовані втрати тиску і структура течії в його елементах. Аналіз отриманих даних дозволив визначити напрями подальших розрахункових та експериментальних досліджень, спрямованих на вдосконалення проточної частини вихлопних трактів.

Ключові слова: газоперекачувальний агрегат, газотурбінний привід, вихлопний тракт, гідравлічний опір, зони зворотних течій, газовідвідний пристрій, чисельне дослідження.

**A.V. Smirnov, A.M. Shchedrenkov, O.M. Shcherbakov, A.Yu. Karutskiy, V.P. Parafiyuk.
Numerical investigation of gas flow in the exhaust system of the natural gas turbocompressor
package driven by gas-turbine engine DU80L1**

The results from numerical simulations of gas flow in two modifications of the exhaust system (with ducts of rectangular and circular cross-sections) for natural gas turbocompressor packages GPA-C-25M driven by gas turbine engine DU80L1 are presented in this paper. Summary friction losses of the named exhaust systems as well as total pressure losses and flow structure in their elements have been evaluated. Due to analysis of the obtained results purposes for further theoretical and experimental researches to improve exhaust systems of the gas-turbine driven turbocompressor packages have been determined.

Key words: natural gas turbo-compressor package, gas turbine engine, exhaust system, hydraulic losses, reversed flow regions, exhaust duct, numerical simulations.