КОНВЕРТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ АЛ-31СТ К УСЛОВИЯМ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

CONVERTING THE AL-31ST ENGINE TO THE CONDITIONS OF MAIN GAS PIPELINES COMPRESSOR STATIONS

А. А. Арнст
Aleksandr A. Arnst

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Н. А. Гаррис
Nina A. Garris

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Р. Н. Бахтизин
Ramil N. Bakhtizin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Турбореактивные двигатели, созданные для военной и гражданской авиации, рассчитаны для полетов на высотах от 9000 до 12000 м, где температура воздуха стабильна и равна минус 55 °С, а давление воздуха соответствует 150 мм рт. ст., что в пять раз меньше атмосферного давления у поверхности Земли.

Показано, что газотурбинный привод АЛ-31СТ имеет большую чувствительность к изменению температуры воздуха, поступающего в компрессор. В условиях компрессорных станций магистральных газопроводов, на территориях с континентальным и резко-континентальным климатом, температура воздуха сильно меняется (например, в условиях Башкортостана в течение суток колебания температуры воздуха могут достигать 18 °С), вследствие чего работа газотурбинного двигателя нестабильна, лопатки турбины высокого давления (ТВД) испытывают перегрузки и часто ломаются. С целью определения степени рациональной загрузки ГПА-16Р «Уфа» по мощности, в диапазоне граничных температур воздуха с отклонением на ± 30 °С от номинальной, равной 15 °С, при которой перо лопатки испытывает наименьшую нагрузку изгибающими моментами, выполнен перерасчет привода АЛ-31СТ к условиям наземного применения. Проведен анализ отличий эксплуатационных параметров от номинальных.

Создана модель обтекания рабочей лопатки в относительном движении потока газа и представлены результаты расчета в виде полей скоростей и давлений в программе COMSOL Multiphysics 4 в диапазоне температур воздуха от минус 15 °С до 45 °С. Выявлено значительное различие режимов и установлен факт перегрузки лопаток ТВД по изгибающим моментам, до 5 % при граничных температурах.

В результате подтверждено предположение специалистов, производящих исследование причин поломки лопаток ТВД, что поломка лопаток связана с «...сопутствующими факторами», а не с «дефектами металлургического или литейного характера». Лопатка ТВД разрушается от усталости материала, вызванной периодическими изгибающими моментами от колебания температуры наружного воздуха с превышением допустимой нагрузки до 5 % по мощности в интервале эксплуатационных температур. На основе анализа работы привода АЛ-31СТ в диапазоне граничных температур наружного воздуха (± 30 °С от номинальной температуры) рекомендуется поддерживать режим работы данного привода не более, чем на 0,95 от номинальной загрузки по мощности.

Turbojet engines designed for military and civil aviation are intended for flights at level from 9000 to 12000 m, where the air temperature is stable (minus 55 °C), and the air pressure corresponds to 150 mm Hg which is five times less than the atmospheric pressure at the surface of the Earth.

It is shown that the AL-31ST gas turbine drive has a high sensitivity to the change in the temperature of the air entering the compressor. In the conditions of main gas pipelines compressor stations, in the territories with a continental and sharply continental climate, the

Ключевые слова

компрессорные
станции,
конвертирование
газотурбинного
двигателя,
обрыв лопаток,
влияние
температуры
воздуха,
нестабильный
режим

air temperature varies greatly (for example, in the conditions of Bashkortostan during 24 hours, air temperature fluctuations can reach 18 °C), as a result of which the operation of the gas turbine engine is unstable, and the blades of high pressure turbine (HPT) experience overload and often break down.

In the article, in order to determine the level of rational power loading of GPU-16R «Ufa», in the range of the boundary air temperatures with a deviation of ± 30 °C from the nominal value of 15 °C, at which the blade feather experiences the least load with bending moments, the AL-31ST drive has been recalculated to conditions of Earth-surface application. The analysis of differences between operating and nominal parameters is performed.

A flow model of a rotor blade in the relative motion of a gas flow is created and the results of calculation in the form of velocity and pressure fields in the COMSOL Multiphysics 4 program are presented for the air temperature range from minus 15 °C to 45 °C. A significant difference in the modes is revealed, and the fact of HPT blades overload with bending moments is established, up to 5 % at the boundary temperatures.

As a result, the hypothesis of specialists investigating the causes of breakage of the HPT blades was confirmed, that the breakage of the blades is associated with «... related factors», and not «with defects of a metallurgical or casting nature». The HPT blade breaks from the material fatigue caused by periodic bending moments due to fluctuations in the outside air temperature, exceeding the permissible power load up to 5 % in the operating temperature range.

Based on the analysis of the AL-31ST drive operation in the range of the outside air temperature limits (± 30 °C from the nominal temperature), it is recommended to maintain the operating mode of this drive of no more than 0.95 of the nominal load power.

Key words

compressor stations, conversion of gas turbine engine, breakage of blades, influence of air temperature, unstable mode

При эксплуатации газотурбинного привода АЛ-31СТ на компрессорных станциях магистрального газопровода выявилось, что заявленный заводом-изготовителем ресурс работы привод не вырабатывает по причине обрыва рабочей лопатки первой ступени турбины высокого давления (ТВД). Авария происходила в результате разрушения в корневом сечении пера рабочей лопатки вследствие усталостной прочности материала. Так как это явление было не единичным [1–3], то остро встал вопрос поиска причины обрыва охлаждаемых лопаток ТВД.

В связи с этим длительное время проводится комплексная работа по выявлению истинных причин и устранению имеющихся дефектов двигателя. Как отмечено в [1], «...ни один разбор оборвавшихся лопаток не указывает на дефекты металлургического или литейного характера». Не исключено, **«...что выход из строя двигателя АЛ-31СТ связан не только с основным, но и сопутствующими факторами, которые предстоит выявить»**.

Большой объем работ по исследованию причин аварий в условиях промышленного эксперимента [3, 4] не дал полного представления об истинной причине поломки лопаток и до сих пор остается открытым.

Возможной первопричиной слома пера лопатки являются переменные изгибные усилия, которые возникают при обтекании пера лопатки при нерасчетных режимах. Изгибные колебания возникают в результате нестабиль-

ности и неравномерности рабочего потока в межлопаточных каналах ТВД двигателя, работающего в трассовых условиях компрессорных станций магистральных газопроводов.

Газотурбинный привод (ГТП) является основным при транспорте газа в ОАО «Газпром». В планах технической модернизации компрессорных станций (КС), ОАО «Газпром» ориентирован в первую очередь на отечественных производителей газотурбинного оборудования. В работу по созданию газовых турбин наземного применения и газоперекачивающих агрегатов на их основе включились практически все отечественные двигателестроительные фирмы.

В основном все двигателестроительные фирмы берут уже готовые турбореактивные двигатели, созданные для военной и гражданской авиации, которые рассчитаны для полетов на высотах от 9000 до 12000 м, где температура воздуха стабильна и равна минус 55 °C, а давление воздуха примерно 150 мм рт. ст. [5], что в пять раз меньше атмосферного давления у поверхности Земли, равного 760 мм рт. ст.

Рабочие параметры турбореактивного двигателя специально рассчитаны для режимов полета. Использование турбореактивных двигателей с такими исходными параметрами в земных условиях просто нецелесообразно. Поэтому турбореактивный двигатель конвертируют для наземных условий, пересчитывая параметры двигателя и изменяя его строение.

Сложность такой конвертации заключается в том, что двигатель нужно просчитывать на всех возможных режимах работы в условиях компрессорных станций магистральных газопроводов (КС МГ) и корректировать работу турбин, которые работают, как показывает практика [6], в нестационарных режимах.

Режимы наземных газотурбинных установок (ГТУ) значительно отличаются от режимов в полете.

Из теории турбомашин известно [7], что при перепаде давления наружного воздуха и постоянной его температуре мощность привода меняется пропорционально изменению наружного давления. Это существенно для авиационных двигателей. Однако в условиях КС МГ колебания давления наружного воздуха на отдельных компрессорных станциях происходят в сравнительно малых пределах, и влияние изменения давления наружного воздуха на работу привода невелико.

Температурные колебания наружного воздуха влияют более существенно. Колебание температуры наружного воздуха t_a при неизменной температуре газов перед турбиной t_T приводит к тому, что с понижением t_a мощность и частота вращения вала привода АЛ-31СТ возрастают, повышается пропускная способность газоперекачивающего агрегата. Одновременно с этим растет КПД привода. Повышение t_a приводит к падению мощности и частоты вращения вала привода АЛ-31СТ. Нагрузка на лопатки турбины при этом значительно увеличивается. Повышение мощности привода до номинальной путем повышения температуры газа перед турбиной сверх расчетной недопустимо.

Большая чувствительность газотурбинного привода АЛ-31СТ к температуре воздуха, поступающего в компрессор, объясняется следующими причинами:

- во-первых, современные стационарные газотурбинные энергоприводы имеют постоянные проходные сечения газовой турбины и осевого компрессора, что исключает возможность регулирования расхода воздуха при неизменных параметрах рабочего тела газотурбинного двигателя;

- во-вторых, современные газотурбинные энергоприводы характеризуются большим значением отношения работ сжатия и расширения $\lambda = h_{ic}/h_{iz} = 0,6 \div 0,7$ на номинальном режиме работы и $\lambda = 0,8$ на частичных нагрузках.

Резкого влияния температуры наружного воздуха на режим и показатели работы энергопривода АЛ-31СТ можно избежать, применяя поворотный входной направляющий аппарат в компрессоре или поворотный направляющий аппарат в турбине. Исследования показали большую эффективность указанных устройств.

Выпускаемые заводом-изготовителем газотурбинные приводы АЛ-31СТ имеют неподвижный лопаточный аппарат направляющей ступени турбины высокого давления, проектируются и изготавливаются на одну начальную температуру цикла (15°C), но эксплуатируются при разных условиях наружного воздуха.

В районах с континентальным и резко-континентальным климатом колебания температур велики. Так, в районах Башкортостана колебания суточных температур могут достигать 18°C ; абсолютный максимум $t_{\max} = 38^\circ\text{C}$; абсолютный минимум $t_{\min} = -44^\circ\text{C}$ [8].

Проведенное нами исследование влияния одного из сопутствующих факторов: температуры воздуха в районе КС МГ [9–11] — позволило установить, что в районах с континентальным и резко-континентальным климатом, под действием колебания температур воздуха, нагрузка на перо лопатки может увеличиваться за счет климатического фактора на 5 %.

С целью определения степени рациональной загрузки ГПА-16Р «Уфа» по мощности, в диапазоне граничных температур с отклонением на $\pm 30^\circ\text{C}$ от номинальной, равной 15°C , при которой перо рабочей лопатки ТВД испытывает наименьшую нагрузку изгибающими моментами, были решены задачи:

- определены условия эксплуатации привода АЛ-31СТ на КС МГ;

- проведен перерасчет привода АЛ-31СТ к условиям наземного применения и выполнен анализ отличий эксплуатационных параметров от номинальных;

- создана 2D модель течения потока газа на расчетном режиме в проточной части турбины высокого давления и использована для анализа нерасчетных режимов;

- определены изгибающие моменты, действующие на рабочую лопатку ТВД, в рассматриваемом диапазоне параметров и даны предварительные рекомендации по загрузке агрегата (с учетом диапазона граничных температур с отклонением $\pm 30^\circ\text{C}$ от температуры 15°C , соответствующей номинальному режиму).

В результате доказана существенная зависимость изгибающего момента, действующего на рабочую лопатку турбины высокого давления, от температуры воздуха в рабочем диапазоне температур — одного из параметров, определяющих ресурс работы лопаток ТВД.

Для исследования параметров потока газа в ТВД была составлена блок-схема алгоритма расчета и сравнения параметров потока в межлопаточных каналах (рисунок 1). Алгоритм отражает основные этапы проведенного исследования при работе на различных режимах двухконтурного турбореактивного двигателя.

Работа ТВД в номинальном режиме

В ходе расчета и исследования параметров потока газа в межлопаточных каналах ТВД создана модель обтекания рабочей лопатки в относительном движении потока газа. На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчета

полей скоростей и давлений в программе COMSOL Multiphysics 4.3 [12] в номинальном режиме, т. е. при температуре воздуха 15 °С.

На номинальном режиме поток газа обтекает профиль рабочей лопатки относительно ровно с небольшими завихрениями в начале пера лопатки и в конце, что характеризуется несовершенством входных и выходных кромок.

Совершенно идеальных входных и выходных кромок достигнуть практически невозможно, поэтому кромочные потери энергии всегда есть. Номинальный режим обтекания рабочей лопатки и, следовательно, всего привода, благоприятен, так как на этом режиме привод максимально реализует свои, заложенные конструкторами, параметры. Поля давлений распределены равномерно, нагружая рабочую лопатку ТВД в каждой точке.

Рисунок 1. Блок-схема алгоритма расчета и сравнения гидродинамических параметров потока в межлопаточных каналах

Рисунок 2. Поля скоростей потока газа, обтекающего рабочую лопатку ТВД на номинальном режиме

Рисунок 3. Поля давлений потока газа, обтекающего рабочую лопатку ТВД на номинальном режиме

Так, на всю рабочую лопатку действует равномерно распределенная сила, заставляя рабочую решетку вращаться. Такое распределение полей давлений можно упрощенно представить на рисунке 4.

Работа ТВД на нерасчетных режимах

Исследование температурных режимов в условиях компрессорных станций магистрального газопровода в резко-континентальном климате показало большие различия

в температурах на входе в осевой компрессор газотурбинного привода АЛ-31СТ, с отклонениями примерно в $\pm 30^\circ\text{C}$ от номинального режима. Поэтому, с целью получения нерасчетных нагрузок в виде изгибающих моментов на поверхности рабочих лопаток ТВД, были проведены расчеты «на граничных» температурах минус 15°C и 45°C и построены поля скоростей и давлений в межлопаточных каналах рабочей решетки ТВД.

Рисунок 4. Схема распределения давлений, действующих на рабочую лопатку ТВД на номинальном режиме

а) температура наружного воздуха минус 15 °С

При изменении температуры наружного воздуха от 15 °С до минус 15 °С поля скоростей и давления меняются (рисунки 5 и 6). Появляются вихреобразные зоны в начале спинки, поток газа смещается на корытце соседней рабочей лопатки, что влечет за собой неправильное обтекание лопатки ТВД. При изменении режима обтекания появляется «ударная составляющая» силы, которая заставляет вращаться с разной скоростью рабочую решетку турбины. Такой режим неблагоприятно сказывается на работе привода, хотя мощность привода и возрастает в отрицательной зоне температур наружного воздуха. С другой стороны, температура после камеры сгорания при отрицательной температуре наружного воздуха ниже, чем на номинальном

режиме, и рабочая лопатка охлаждается лучше. Тепловая нагрузка на рабочую лопатку в зимний период эксплуатации привода меньше, чем в номинальном режиме.

Изображенные поля давлений на рисунке 6 имеют локальные отклонения, что приводит к перераспределению сил давления на рабочую лопатку ТВД и свидетельствует об изменении крутящего момента, т. е. силового воздействия на лопатку (рисунок 7).

б) Температура наружного воздуха 45 °С

При изменении температуры наружного воздуха до 45 °С характер обтекания рабочей лопатки ТВД сильно меняется. Появляются зоны образования вихрей (рисунок 8). При появлении вихрей теряется часть энергии потока, что уменьшает мощность привода. Особенно это заметно в летний период экс-

Рисунок 5. Поля скоростей потока газа, обтекающего рабочую лопатку ТВД, при температуре наружного воздуха $t_a = -15$ °С

Рисунок 6. Поля давлений потока газа, обтекающего рабочую лопатку ТВД, при температуре наружного воздуха минус 5 °С

Рисунок 7. Схема распределения давлений, действующих на рабочую лопатку ТВД, в зимний период эксплуатации

Рисунок 8. Поля скоростей потока газа, обтекающего рабочую лопатку ТВД, при температуре наружного воздуха 45 °С

плутации привода, так как часть мощности тратится на привод компрессоров КНД и КВД. Такое течение потока газа характеризуется неравномерностью обтекания пера рабочей лопатки и перераспределением скоростей.

Поля давлений также перераспределяются, имеют также зональный характер распределения (рисунок 9), появляются зоны образования вихрей, в которых преобладает попеременное (пульсирующее) изменение давления. Именно это заставляет рабочую лопатку ТВД в условиях газокomppressorных станций испытывать изгибающие моменты, превышающие расчетные. Такое распределение полей давлений можно упрощенно представить на рисунке 10.

Таким образом, выполненные расчеты показали значительные отличия кинематики и динамики потока газа при граничных значе-

ниях температур наружного воздуха минус 15 °С и 15 °С, что свидетельствует о нестациональности термодинамического состояния системы ТВД при климатических изменениях температуры воздуха и особенно при суточных изменениях температуры.

Силовые воздействия потока газа на рабочую лопатку

Для квазистационарного потока, на основании уравнения неразрывности, можно полагать, что через межлопаточный канал проходит масса газа $m = \text{const}$. Это позволяет приближенно определить величину импульса силы, действующего на рабочую лопатку на разных режимах. За счет импульса силы рабочие лопатки ТВД приводятся в движение газовым потоком. Следовательно, на основании закона сохранения импульса силы

Рисунок 9. Поля давлений потока газа, обтекающего рабочую лопатку ТВД, при температуре наружного воздуха 45 °С

Рисунок 10. Схема распределения давлений, действующих на рабочую лопатку ТВД, в летний период эксплуатации

$$d(mv) = Fdt \quad (1)$$

можно считать, что при изменении скорости потока v , обтекающего рабочую лопатку ТВД, пропорционально изменяется и импульс силы Fdt , действующий на нее. Соответственно, при изменении режима лопатка испытывает силу, которая заставляет ее гнуться из стороны в сторону, тем самым вызывая «усталость» материала. При этом практически пропорционально, с отклонением тоже примерно в $\pm 5\%$ от значения, соответствующего номинальному режиму, изменяется сила, действующая на лопатку.

Зная силу, действующую на лопатку, можно определить момент, ее изгибающий.

На рисунке 11 представлена схема изгиба и растяжения лопатки турбины. Главные оси сечения x и y повернуты относительно осей конструкции $x_0 y_0$ на угол α (ось x_0 направлена вдоль оси вращения, ось z — вдоль оси лопатки в радиальном направлении).

В сечении z действуют растягивающее усилие N и изгибающие моменты M_{x_0} и M_{y_0} . На рисунке 11 они изображены векторами, причем момент стремится осуществить поворот против часовой стрелки, если смотреть от конца вектора к его началу (правая система координат).

С учетом пространственной ориентации изгибающего лопатку момента M получены значения изгибающих моментов на нерасчетных режимах, отличие которых от значений, соответствующих номинальному режиму, достигает $\pm 5\%$ (таблица 1).

Таблица 1. Значения изгибающих моментов, действующих на лопатку ТВД

Температура воздуха, °С	– 15	15	45
M , Н·м	73,2	77,2	81,2
ΔM , %	– 5,15	0	+ 4,87

Из таблицы 1 видно, что изгибающие моменты при изменении температуры воздуха на входе в осевой компрессор меняются в пределах $\pm 5\%$ также быстро, как и температура воздуха. Такие изменения изгибающего момента для рабочей лопатки ТВД значительны, т. к. по размерам рабочая лопатка ТВД привода АЛ-31СТ достаточно мала. Фактическая нагрузка на лопатки может быть существенно больше, т. к. на нее воздействуют тепловые нагрузки, изменение которых трудно учесть аналитически вследствие неопределенности многих параметров, центробежные силы и т. п.

Моменты, изгибающие перо лопатки, могут изменяться в зависимости от скорости протекания газового потока, т. к.

$$\frac{d(mv)}{dt} = F = \frac{2 \cdot M}{R_n}. \quad (2)$$

При колебаниях скорости происходит и колебание изгибающих моментов пера лопатки. Также при изменении скорости происходит перераспределение угла атаки, что может привести к срыву потока при обтекании пера, что хорошо видно на рисунках 2 и 8.

При достижении некоторой критической скорости, зависящей от характеристик конструкции лопатки, могут возникать самовозбуждающиеся незатухающие изгибающие и

Рисунок 11. Изгиб и растяжение лопатки (α — угол атаки)

крутящие автоколебания элементов конструкции. Возникающий резонанс может привести к разрушению пера лопатки.

Выводы

1. Подтверждено предположение специалистов, производящих исследование причин поломки лопаток ТВД и полагающих, что поломка лопаток связана с «сопутствующими факторами, которые предстоит выявить» [1, 2]. Лопатка ТВД разрушается от усталости материала, вызванной периодическими изги-

бающими моментами от колебания температуры наружного воздуха с превышением допустимой нагрузки до 5 % в интервале эксплуатационных температур.

2. Рекомендуется для сохранения работоспособности привода АЛ-31СТ в диапазоне граничных температур наружного воздуха ($\pm 30^\circ\text{C}$ от номинальной) поддерживать режим работы данного привода не более чем на 0,95 от номинальной загрузки по мощности.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ОАО «УМПО»: вопрос повышения надежности двигателя АЛ-31СТ — на особом контроле // Республика Башкортостан. 1 августа 2012 г. Режим доступа: URL: www.umpo.ru СМИ об УМПО (дата обращения: 01.09.2015).

2. «Подкачавший» двигатель АЛ31-СТ будет доработан // 1 августа 2012 г. Режим доступа: URL: www.i-mash.ru/news/nov_predpr/24299-podkachavshijj-dvigatel-al-31st (дата обращения: 01.09.2015).

3. «Газпром» применит двигатель АЛ-31СТ на своих объектах. 9 июня 2015. Режим доступа: URL: <http://a-economics.ru/news/theme-withouttheme/code-3304>. (дата обращения: 01.09.2015).

4. Акимов В.И., Бакиев Т.А., Балюк Ю.А., Скрынников С.В. Опыт контроля лопаток ТВД газотурбинных двигателей АЛ31-СТ в условиях КС // Газовая промышленность. 2015. № 1. С. 62–63.

5. Изменение давления воздуха с высотой [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://aviaciportal.ru/izmenenie-davlenia-vozduha-s-vysotoj> (дата обращения: 14.09.2015).

6. Исмагилов И.Г. Особенности теплового взаимодействия магистрального газопровода большого диаметра с грунтом: дис. канд. техн. наук. Уфа, 2010. 191 с.

7. Котляр И.В., Гительман А.И., Ермолин В.И. Переходные процессы в газотурбинных установках. Л.: Машиностроение, 1973. 254 с.

8. Справочник по климату СССР. Вып. 9. Пермская, Свердловская, Челябинская области и Башкирская АССР. Часть II, III, IV. Температура воздуха и почвы. Ленинград, 1965. 363 с.

9. Арнст А.А., Гаррис Н.А. Учет изменения температуры воздуха при конвертировании авиационного газотурбинного двигателя к условиям компрессорных станций // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 5. С. 74–80.

10. Арнст А.А., Гаррис Н.А. Исследование влияния температуры атмосферного воздуха на ГТД с помощью параметрического уравнения Холщевникова // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Новополюк, 2014. С. 69–71.

11. Арнст А.А., Гаррис Н.А. Детальный расчет элементов газотурбинного привода нагнетателей КС МГ // Рассохинские чтения: матер. Междунар. семинара (6-7 февраля 2014 г.): в 2 ч. / Под ред. Н.Д. Цхадая. Ухта: УГТУЭ, 2014. Ч. 2. С. 238–240.

12. COMSOL LLC, производственно-информационная компания программного обеспечения: официальный сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.comsol.ru/company> (дата обращения: 19.03.2015).

REFERENCES

1. ОАО «УМПО»: vopros povysheniya nadezhnosti dvigatelya AL-31ST – na osobom kontrole [The Question of Increasing the Reliability of the AL-31ST Engine — on Special Control]. *Respublika Bashkortostan — Republic of Bashkortostan*. 1 avgusta 2012 g. Available at: URL: www.umpo.ru SMI ob UMPO (accessed 01.09.2015). [in Russian].

2. «Podkachavshii» dvigatel' AL31-ST budet dorabotan. 1 avgusta 2012 g. [The «Messed Up» Engine AL31-ST Will Be Developed. August, 1, 2012]. Available at: URL: www.i-mash.ru/news/nov_predpr/24299-podkachavshijj-dvigatel-al-31st (accessed 01.09.2015). [in Russian].

3. «Gazprom» primenit dvigatel' AL-31ST na svoikh ob"ektakh. 9 iyunya 2015 [«Gazprom» Will Use the AL-31ST Engine at its Facilities. June, 9, 2015]. Available at: URL: <http://a-economics.ru/news/theme-withouttheme/code-3304>. (accessed 01.09.2015). [in Russian].

4. Akimov V.I., Bakiev T.A., Balyuk Yu.A., Skrynnikov S.V. Opyt kontrolya lopatok TVD gazoturbinnykh dvigatelei AL31-ST v usloviyakh KS [High-Pressure Turbine Blades Monitoring: Compressor Station Experience]. *Gazovaya promyshlennost — Gas Industry*, 2015, No. 1, pp. 62-63. [in Russian].

5. *Izmenenie davleniya vozdukh s vysotoi* [Change in Air Pressure with Altitude]. [Electronic Resource]. Available at: URL: <http://aviaciportal.ru/izmenenie-davlenia-vozduha-s-vysotoj> (accessed 14.09.2015). [in Russian].

6. Ismagilov I.G. *Osobennosti teplovogo vzaimodeistviya magist-ral'nogo gazoprovoda bol'shogo diametra s gruntom: dis. kand. tekhn. nauk* [Features of Thermal Interaction of the Main Gas Pipeline of Large Diameter with Ground. Cand. Tekhn. Sci. Diss.]. Ufa, 2010. 191 p. [in Russian].

7. Kotlyar I.V., Gitel'man A.I., Ermol'gin V.I. *Perekhodnye protsessy v gazoturbinnykh ustanovkakh* [Transient Processes in Gas Turbine Installations]. Leningrad, Mashinostroenie, 1973. 254 p. [in Russian].

8. *Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 9. Permskaya, Sverdlovskaya, Chelyabinskaya oblasti i Bashkirskaya ASSR. Chast' II, III, IV. Temperatura vozdukh i pochvy*

[Reference Book on the Climate of the USSR. Issue. 9. Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk Regions and the Bashkir ASSR. Parts II, III, IV. Air and Soil Temperature]. Leningrad, 1965. 363 p. [in Russian].

9. Arnst A.A., Garriss N.A. Uchet izmeneniya temperatury vozdukhа pri konvertirovaniі aviatsionnogo gazoturbinnogo dvigatelya k usloviyam kompressornykh stantsii [Air Temperature Variation Recording at Aircraft Gas Turbine Engine Conversion to Compressor Stations Conditions]. *Territoriya «NEFTEGAZ» — Territory «NEFTEGAZ»*, 2016, No. 5, pp. 74–80. [in Russian].

10. Arnst A.A., Garriss N.A. Issledovanie vliyaniya temperatury atmosfernogo vozdukhа na GTD s pomoshch'yu parametricheskogo uravneniya Kholshchevnikova [Investigation of the Influence of Air Temperature on GTE Using the Parametric Equation of Kholshchevnikov]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nadezhnost' i bezopasnost' magistral'nogo truboprovodnogo transporta»* [Proceedings of the VIII

International Scientific and Technical Conference «Reliability and Safety of the Main Pipeline Transport»]. Novopolotsk, 2014, pp. 69–71. [in Russian].

11. Arnst A.A., Garriss N.A. Detal'nyi raschet elementov gazotur-binnogo privoda nagnetatelei KS MG [Detailed Calculation of the Elements of the Gas Turbine Drive Superchargers of Compressor Station of Main Gas Pipeline]. *Materialy Mezhdunarodnogo seminara «Rassokhin'skie chteniya»*: v 2 ch. (6-7 February 2014). [Materials of the International Seminar «Rassokhin Readings»: in 2 Ch. (February, 6-7, 2014)]. Ukhta, UGTUE Publ., 2014, Ch. 2, pp. 238–240. [in Russian].

12. COMSOL LLC, proizvodstvenno-informatsionnaya kompaniya programmogo obespecheniya: ofitsial'nyi sait [COMSOL LLC, Production and Information Company Software: Official Site]. [Electronic Resource]. Available at: URL: <https://www.comsol.ru/company> (accessed 19.03.2015). [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Гаррис Нина Александровна, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Nina A. Garriss, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Fluid Dynamics of Pipeline Networks and Fluid Machinery Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: nina_garriss@mail.ru

Арнст Александр Андреевич, магистрант кафедры «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Aleksandr A. Arnst, Graduate Student of Fluid Dynamics of Pipeline Networks and Fluid Machinery Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ya.vanhelen@yandex.ru

Бахтизин Рамиль Назифович, д-р физ.-мат. наук, профессор, ректор УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ramil N. Bakhtizin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Rector of USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: rector@rusoil.net