

УДК 621.438:621.45.038.3

А.И. ТАРАСОВ, канд. техн. наук, О.А. ЛИТВИНЕНКО

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТОЙ ПОДЛОЖКИ, НАСЫЩЕННОЙ  
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В НАПРАВЛЯЮЩЕЙ  
ЛОПАТКЕ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ**

Виконано модернізацію системи охолодження направляючої лопатки високотемпературної газової турбіни за рахунок застосування пористої підкладки, насиченої рідиннометалевим теплоносієм. Як прототип була використана направляюча лопатка турбіни високого тиску авіаційного двигуна.

В настоящее время важным направлением в развитии энергетического газотурбиностроения является создание агрегатов большой единичной мощности, а также включение их в состав парогазовых установок. В связи с постоянным ростом цен на энергоносители, большое внимание уделяется экономичности как стационарных, так и транспортных газотурбинных установок. Важное значение приобретают вопросы обеспечения надежной работы энергетического оборудования.

Задачи совершенствования стационарных и транспортных газотурбинных установок и газотурбинных двигателей всех типов решаются путем освоения все более высоких температур газа ( $T_g$ ). Поскольку темпы повышения жаропрочности сплавов для газовых турбин существенно отстают от роста  $T_g$ , единственным реальным путем повышения  $T_g$  в ближайшем будущем остается применение охлаждения наиболее нагретых и наиболее нагруженных деталей газовых турбин, в первую очередь сопловых и рабочих лопаток. Поэтому исследование и разработка проблем освоения высоких температур газа в газотурбинных установках посредством применения высокоэффективного охлаждения деталей турбин является одним из наиболее актуальных направлений развития современного газотурбиностроения [1].

Несмотря на то, что имеется большой опыт отечественных, а также зарубежных организаций и фирм в разработке различных методов охлаждения деталей газовых турбин, в частности, воздушных конвективных, пленочных, пористых и комбинированных систем охлаждения, актуальным остается создание новых, более эффективных способов охлаждения.

Тепловые трубы с пористым наполнителем обладают очень высоким коэффициентом приведенной теплопроводности, что позволяет их применять для передачи больших тепловых мощностей при практически изотермических условиях. В этом смысле их применение чрезвычайно привлекательно для охлаждения элементов газовых турбин.

Проведенный анализ показал, что использование тепловых труб для охлаждения элементов газовых турбин ограничено в связи с многообразием положений в пространстве охлаждаемых элементов и, следовательно, различным воздействием сил гравитации на них. Однако перспективным оказывается использование тепловых труб для выравнивания температурного поля тел в тех местах, где граничные условия изменяются достаточно резко. Примером таких высоконагруженных элементов является входная кромка направляющих и рабочих лопаток, область ламинарно-турбулентного перехода. В этих случаях коэффициент теплоотдачи на внешней

поверхности лопатки на коротком расстоянии изменяется в два - три раза. Положение максимума в силу неточности расчетных методов определено приближенно и, кроме того, максимум и его положение может изменяться при изменении режима двигателя. Указанная неопределенность отвода теплоты от газа не позволяет организовать надежный адекватный отвод теплоты с внутренней стороны лопатки к воздуху. В связи с этим представляет интерес исследование возможности снижения градиентов температуры вдоль оболочки лопатки за счет установки пористой подложки с жидкометаллическим теплоносителем на внутренней поверхности лопатки.

Таким образом, проблема сводится к решению задачи теплового состояния многослойной системы, состоящей из нагреваемой оболочки лопатки, пористой среды, заполненной жидкометаллическим теплоносителем и внутренней охлаждаемой воздухом изолирующей тонкой стенки. В отличие от традиционных схем тепловых труб в данном случае предлагается система без пароотводящих каналов, т.е. полностью замкнутый пористый резервуар, в котором поддерживается двухфазное состояние теплоносителя, а передача теплоты осуществляется взаимно противоположным движением пара и жидкости вследствие диффузии. Поэтому основной проблемой при решении данной задачи являлось моделирование процессов движения и фазового перехода в пористой среде, заполненной теплоносителем.

При моделировании двухфазного теплообмена в пористой среде, насыщенной жидкометаллическим теплоносителем, была использована модель двухфазного переноса Вонга-Беккермана [2], которая включает в себя уравнения сохранения массы, импульса и энергии, а также граничные и начальные условия. Все физические свойства многофазной смеси являются следствием свойств ее составляющих, поэтому для построения уравнений сохранения определены несколько усредненных свойств смеси. Эта модель была адаптирована к условиям работы газовых турбин и численно решена методом конечных элементов. Для решения проблемы теплового состояния многослойной системы были сформулированы условия сопряжения на границах твердого и пористого тел, решено ряд модельных задач [3, 4].

В результате был создан метод проектирования альтернативных систем охлаждения, который предполагает использовать пористую подложку, насыщенную жидкометаллическим теплоносителем для выравнивания температурного поля термонапряженных участков узлов и деталей газовых турбин совместно с воздушным охлаждением. Пример применения этого метода и эффективность использования предложенных изменений в системе охлаждения показан в данной статье на примере направляющей лопатки высокотемпературной газовой турбины (рис. 1). Граничные условия на поверхности лопатки со стороны газа получены с помощью интегрального метода расчета пограничного слоя, с внутренней стороны оболочки лопатки граничные условия определены с помощью гидравлического и теплового расчета конвективной системы охлаждения.

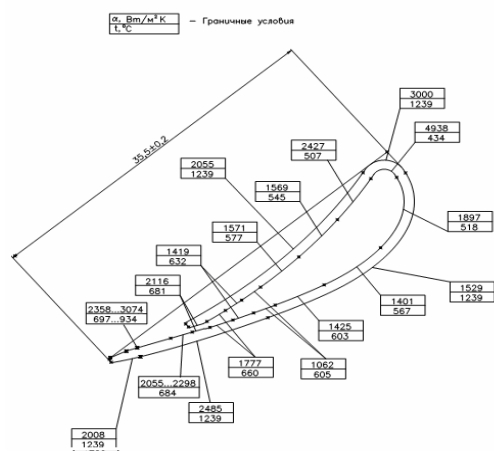


Рис. 1. Граничные условия со стороны газа и воздуха

На первом этапе температурное поле исходной конструкции лопатки было

рассчитано с помощью разработанном в настоящем исследовании метода и комплекса ANSYS 6.1 (рис. 2), признанного мирового лидера в области моделирования теплового и напряженного состояния машин и механизмов. Расчеты были выполнены при одних же тех же граничных условий. Сопоставление результатов показало их полную идентичность, что свидетельствует о надежности предложенного метода и программной реализации.

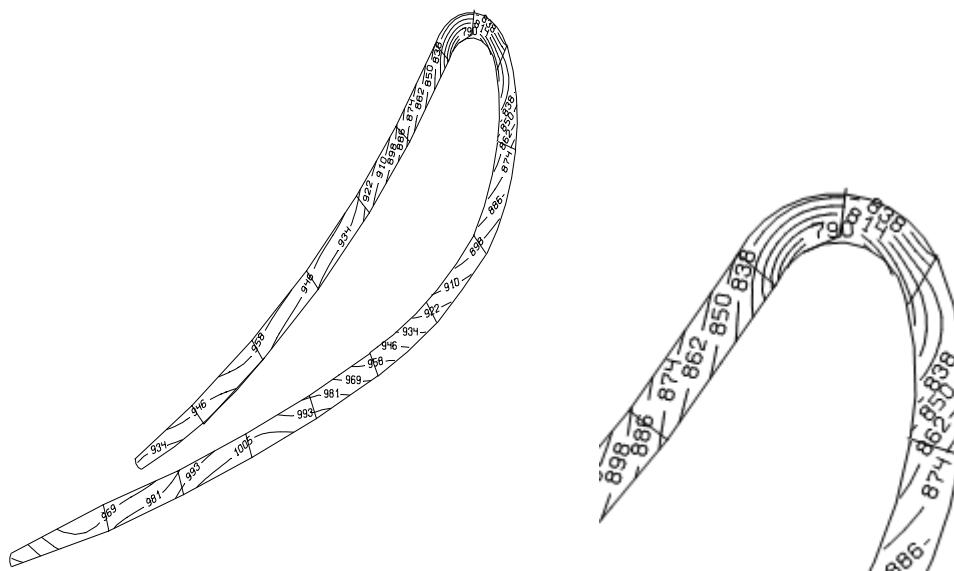


Рис. 2. Температурное поле металлической оболочки

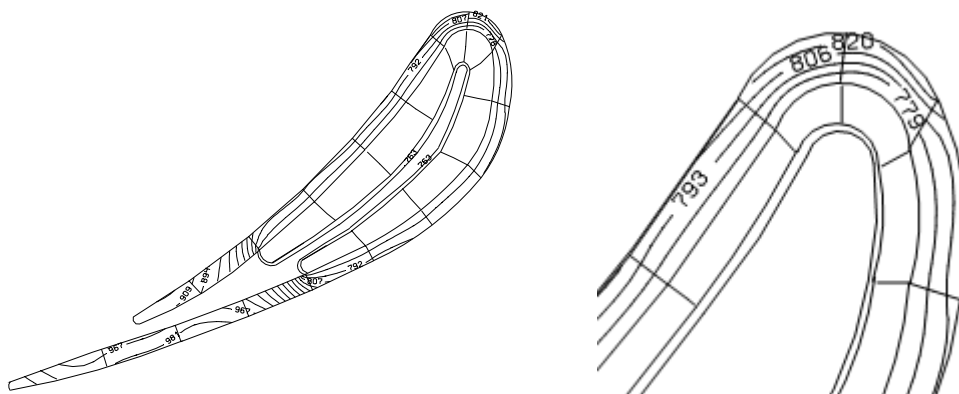


Рис.3. Температурное поле лопатки с пористой вставкой

При заданных граничных условиях температурное поле оболочки достаточно неравномерно. Максимальная температура наблюдается в районе выходной кромки и составляет порядка  $1020^{\circ}\text{C}$ . В этом месте воздух выдувается из охлаждающих каналов, расположенных внутри лопатки и смешивается с основным потоком газа. Температура на входной кромке составляет около  $838^{\circ}\text{C}$ , что достигается струйным обдувом при выдуве воздуха из дефлектора. Градиент температур по выпуклой и вогнутой части лопатки достигает  $100 - 150^{\circ}\text{C}$ .

Применение вдоль обвода профиля пористой вставки, насыщенной двухфазным теплоносителем при температуре насыщения  $765^{\circ}\text{C}$  привело к выравниванию температурного поля и уменьшению температур входной и выходной кромок (рис. 3).

Граничные условия со стороны газа были сохранены такими же, как и в исходной конструкции. Условия с внутренней стороны воздуха были определены с учетом изменения геометрии каналов воздушного охлаждения. Пористая вставка имеет толщину 3 мм, что в 2 раза превышает толщину оболочки.

В этом случае температура выходной кромки опустилась до 970 °С, а входной – до 820 °С. Резко уменьшились градиенты температур на выпуклой и вогнутой поверхностях в местах установки пористой структуры и составили порядка 13 °С. В связи с тем, что в области выходной кромки лопатки узкое сечение, пористую структуру там разместить не удастся. Значение насыщения в пористой структуре в среднем составляет 47% (рис. 4).

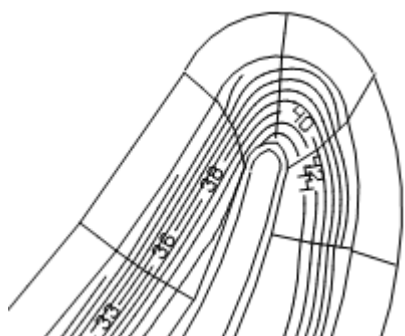


Рис. 4. Линии насыщения лопатки с пористой вставкой

В местах утонения пористой вставки эта величина уменьшается. Вдоль вогнутой поверхности наблюдается перераспределение линий насыщения. Минимальное значение насыщенности – 16 %, где увеличение теплового потока связано с высоким коэффициентом теплоотдачи от газа (2055 Вт/м<sup>2</sup>К). Такое распределение линий насыщения свидетельствует о том, что на этом участке происходит интенсивное, противоположно направленное движения пара и жидкости. Различная интенсивность двухфазного переноса и

позволяет достичь выровненного температурного поля оболочки.

Благодаря проведенным конструкционным изменениям удалось получить равномерное температурное поле элементов лопатки, и обеспечить их необходимое охлаждение.

#### Литература

1. Копелев С.З., Слитенко А.Ф. Конструкции и расчет систем охлаждения ГТД./ под ред. Слитенко А.Ф. – Х.: Изд-во «Основа» при Харьк. университете, 1994. – 240 с.
2. Chao-Yang Wang, C. Beckermann. A two-phase mixture model of liquid-gas flow and heat transfer in capillary porous media - I. Formulation. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1993. – Vol. 36. – No.11. – P.2747-2758.
3. Тарасов А.И., Литвиненко О.А. Применение пористых сред для выравнивания температурного поля элементов газовых турбин. //Вестник Национального технического университета «ХПИ»: Сборник научных трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – №9. – Т. 12. – С. 175 – 180.
4. Тарасов А.И., Литвиненко О.А. Использование элементов с жидкометаллическим теплоносителем в системах охлаждения газовых турбин. //Совершенствование турбоустановок методами математического моделирования: Сб. научн. трудов – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. – 2003. – Т.1. – С. 270-274.

© Тарасов А.И., Литвиненко О.А., 2005