



**САМАРСКИЙ** УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева»

Институт двигателей и энергетических установок  
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов

Глава 6. Основные закономерности  
совместной работы узлов турбокомпрессора ТРДД

## **§ 6.2. Особенности совместной работы узлов двухвального газогенератора**

### 6.2.1 Различный угол наклона линий совместной работы на характеристиках компрессоров ВД и НД

Линии совместной работы на характеристиках компрессоров двухвального ТРД протекают существенно неодинаково, что объясняется неодинаковым изменением пропускной способности сети за компрессорами ВД и НД при изменении отношения температур  $T_{\Gamma}^*/T_{\text{ВД}}^*$ .

Снижение  $(T_{\Gamma}^*/T_{\text{ВД}}^*) \downarrow$  ведет к увеличению пропускной способности сети за компрессором ВД  $\lambda_{\text{К}} \uparrow$  вследствие уменьшения степени подогрева газа в камере сгорания  $(T_{\Gamma}^*/T_{\text{К}}^*) \downarrow$  [4а]. Соответствующее снижение приведенной частоты вращения ротора ВД  $n_{\text{ВД.пр.ВД}}'$ , а следовательно и  $q(\lambda_{\text{ВД}}) \downarrow$ , означает, что пропускная способность сети за компрессором НД уменьшается.

Поэтому линия совместной работы на характеристике компрессора ВД располагается круче, чем линия постоянной пропускной способности  $\lambda_K = \text{const}$ , а на характеристике компрессора НД она положе. А угол наклона линии совместной работы на характеристике компрессора НД всегда меньше, чем на характеристике компрессора ВД.

Соответственно  $\Delta K_{у\text{нд}} < \Delta K_{у\text{вд}}$  на режимах пониженного отношения температур  $T_{\Gamma}^*/T_{\text{ВВД}}^*$  при одинаковых расчетных параметрах компрессоров НД и ВД.

Свойство неодинакового изменения пропускной способности за различными степенями присуще любым многоступенчатым компрессорным системам с нерегулируемыми сечениями, в том числе и многоступенчатым одновальным компрессорам. Действительно, если многоступенчатый одновальный компрессор мысленно разделить на две части и сравнить работу первых ступеней с работой компрессора НД, а работу последних ступеней с работой компрессора ВД, то сделанные выводы справедливы и для ступеней одновального компрессора.

При снижении  $n_{пр}$  неодинаковое изменение пропускной способности за степенями компрессора ведет к рассогласованию их работы: осевая скорость перед последними степенями увеличивается, углы атаки становятся отрицательными, эти ступени разгружаются и переходят на режимы, близкие к запираению; осевая скорость перед первыми степенями уменьшается, углы атаки увеличиваются, ступени дополнительно нагружаются и переходят на срывные режимы.

Таким образом, в системе одновального или двухвального компрессора группа первых ступеней (каскад НД) на пониженных режимах перегружается по сравнению с группой последних ступеней (каскад ВД) и находится в более тяжелых условиях работы.

## 6.2.2 Увеличение отношения частот вращения роторов ВД и НД при снижении отношения температур $T_{\Gamma}^*/T_{\text{ВД}}^*$

Работа ступеней двухвального компрессора отличается специфическими особенностями. Они обусловлены скольжением роторов, которое возникает вследствие неодинакового изменения работы (нагруженности) компрессоров ВД и НД в зависимости от частот вращения их роторов, чему соответствует неодинаковый угол наклона линий совместной работы на характеристиках этих компрессоров.

При снижении температуры газа перед турбиной  $T_{\Gamma}^* \downarrow$  пропорционально уменьшаются работы турбин и компрессоров двухвального газогенератора:

$$T_{\text{ГНД}}^* \downarrow = T_{\Gamma}^* \downarrow \cdot (1 - l_{\text{ТВД}});$$

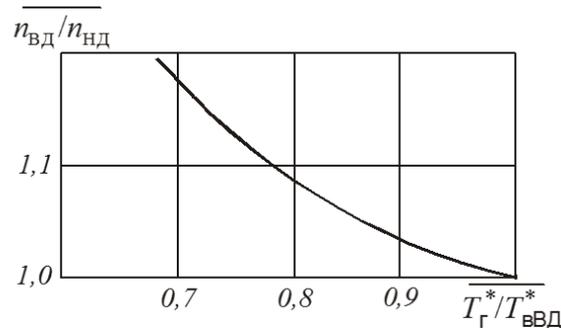
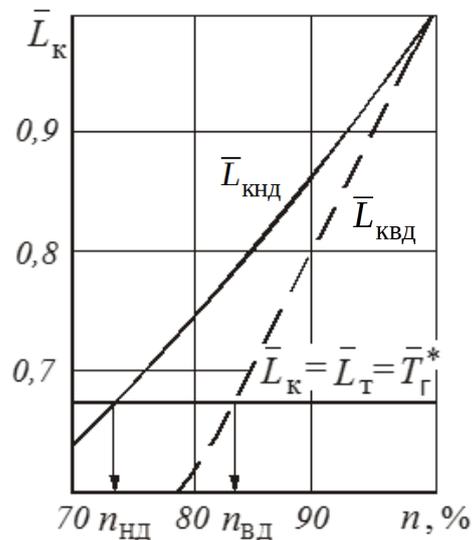
$$L_{\text{ТВД}} \downarrow = c_{p2} \cdot T_{\Gamma}^* \downarrow \cdot l_{\text{ТВД}}; \quad L_{\text{КВД}} \downarrow \sim L_{\text{ТВД}} \downarrow;$$

$$L_{\text{ТНД}} \downarrow = c_{p2} \cdot T_{\text{ГНД}}^* \downarrow \cdot l_{\text{ТНД}}; \quad L_{\text{КНД}} \downarrow \sim L_{\text{ТНД}} \downarrow;$$

$$L_{\text{КНД}} \downarrow \sim L_{\text{КВД}} \downarrow \sim L_{\text{ТНД}} \downarrow \sim L_{\text{ТВД}} \downarrow \sim T_{\Gamma}^* \downarrow.$$

Более пологое расположение линии совместной работы на характеристике компрессора НД указывает на более медленное снижение работы этого компрессора при уменьшении частоты вращения. Поэтому баланс мощности обеспечивается только при неодинаковом снижении частот вращения роторов низкого и высокого давлений:  $n_{\text{НД}}$  уменьшается значительно, чем  $n_{\text{ВД}}$ , а отношение этих величин  $(n_{\text{ВД}}/n_{\text{НД}})$ , которое называется **скольжением роторов**, возрастает.

При сверхкритическом истечении газа из сопла скольжение роторов однозначно определяется отношением температур  $T_{\Gamma}^*/T_{\text{ВД}}^*$ , поскольку частоты вращения роторов определяются положением рабочих точек на характеристиках компрессора.

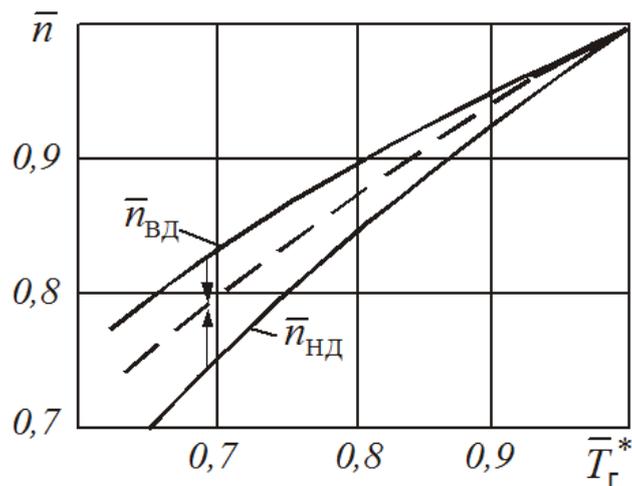


### 6.2.3 Расширение диапазона устойчивой работы компрессоров при переходе от одновального к двухвальному турбокомпрессору за счет скольжения роторов

Чтобы понять характер влияния изменения скольжения роторов ( $n_{ВД}/n_{НД}$ ) на изменение запасов устойчивой работы двухвального компрессора по сравнению с одновальным, проанализируем эффект «сцепления» роторов, при котором отношение частот вращения роторов сохраняется постоянным за счет передачи мощности с турбины ВД на турбину НД.

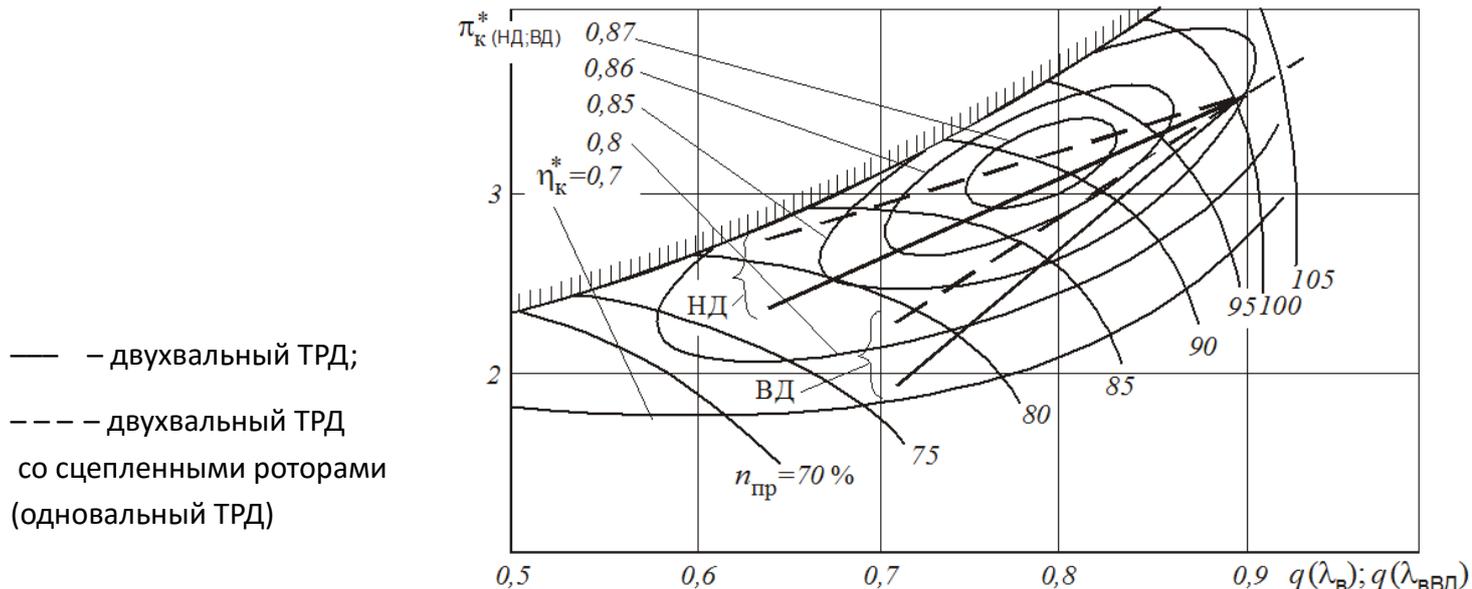
На пониженных режимах «сцепление» приводит к увеличению  $n_{НД} \uparrow$  и к снижению  $n_{ВД} \downarrow$ .

- — двухвальный ТРД;
- - - - двухвальный ТРД со сцепленными роторами (одновальный ТРД)



При этом пропускная способность за компрессором НД уменьшается, линия совместной работы смещается к границе помпажа. На характеристике компрессора ВД она также смещается к границе помпажа вследствие отбора мощности от турбины ВД.

Влияние отбора мощности на положение линии совместной работы также можно проанализировать по уравнению [8].



Итак, «сцепления» роторов приводит к уменьшению запасов устойчивой работы компрессоров НД и ВД и наоборот переход от одновального к двухвальному двигателю приводит благодаря скольжению к повышению запасов устойчивой работы на режимах низких  $n_{пр}$ , что особенно важно для компрессора НД и объясняется увеличением пропускной способности за ним.

Влияние изменения  $(n_{ВД}/n_{НД})$  на  $\Delta K_{уНД}$  в системе двухвального ТРД(Д) удобно анализировать при  $n_{НД} = \text{const}$ . При этом увеличение  $(n_{ВД}/n_{НД}) \uparrow$  означает повышение  $n_{ВД} \uparrow$  и соответственно  $q(\lambda_{ВВД}) \uparrow$ , т.е. за компрессором НД пропускная способность увеличивается, что ведет к смещению рабочей точки вниз, запасы устойчивой работы  $\Delta K_{уНД} \uparrow$  повышаются.

Увеличение скольжения  $(n_{ВД}/n_{НД})$  сопровождается снижением окружных скоростей на компрессоре НД и увеличением их на компрессоре ВД по сравнению с окружными скоростями на ступенях одновального компрессора, в результате чего уменьшаются углы атаки на первых ступенях и увеличиваются на последних. При этом улучшается обтекание венцов, увеличивается КПД компрессора, граница неустойчивой работы сдвигается вверх.

Таким образом, изменение скольжения роторов оказывает благоприятное воздействие на работу компрессора и является главной особенностью совместной работы узлов двухвального газогенератора. Преимущество двухвальных ТРД состоит в том, что изменение скольжения роторов и расширение диапазона их устойчивой работы происходят автоматически (самопроизвольно).