

УДК 621.452.32

Расчетно-экспериментальное исследование влияния отборов воздуха из промежуточной ступени компрессора на его характеристики

Кизеев И.С., Кожемяко П.Г., Эзрохи Ю.А.*

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,

Авиамоторная ул., 2, Москва, 111116, Россия

**e-mail: yaezrokhi@ciam.ru*

Аннотация

В материале представлены результаты оценки изменения протекания характеристик компрессоров в результате перепуска рабочего тела из-за промежуточной ступени. Приведены физические основы влияния перепуска воздуха на характеристики лопаточных машин.

Рассмотрены два компрессора с различным количеством ступеней: трехступенчатый с отбором воздуха из-за первой или второй ступени в количестве от 0 до 15% (относительно расхода воздуха на входе в компрессор) и шестиступенчатый с отбором воздуха из-за третьей ступени в количестве от 0 до 10%.

Полученные результаты численного расчета и экспериментальных замеров показали, что на максимальных частотах вращения дополнительный отбор воздуха не приводит к смещению напорной линии группы ступеней до места отбора, однако напорные линии группы ступеней за местом отбора смещаются вправо-вниз по мере увеличения отбираемого воздуха. На пониженных частотах вращения

дополнительный отбор воздуха для первой группы ступеней также не приводит к смещению напорной линии, но для второй группы ступеней приводит к существенному смещению напорной линии вправо-вверх.

Ключевые слова: компрессор, характеристика компрессора, напорная линия, КПД компрессора, отбор воздуха.

Введение. Постановка задачи

В практике авиационного двигателестроения отбор воздуха из промежуточной ступени компрессора является достаточно часто встречающимся явлением, позволяющим решать различные задачи взаимодействия узлов двигателя между собой (охлаждение элементов турбины, чаще всего, турбины низкого давления, повышение запаса газодинамической устойчивости компрессора на глубоких пониженных режимах и др.).

В настоящее время в нашей стране и за рубежом продолжают работы по совершенствованию методов расчета и проектирования лопаточных машин [1-7], развиваются методы управления и регулирования компрессоров, в том числе в условиях перепуска воздуха [8] из проточной части.

При расчетах параметров и характеристик авиационных турбореактивных двигателей в широком диапазоне их эксплуатационных режимов необходимо использовать характеристики узлов, отражающие изменение их режимов работы в зависимости от способов управления, в том числе при решении оптимизационных

задач. Это особенно справедливо для двигателей изменяемого рабочего процесса, позволяющих расширить диапазон регулирования.

В последнее время в связи с исследованиями трехконтурных схем двигателей изменяемого рабочего процесса (ТРТД – турбореактивный трехконтурный двигатель) [9-17] вентилятор с отбором воздуха рассматривается как основной элемент трехконтурных ТРТД, при этом величины таких отборов могут достигать 15-20% и выше. В данных условиях представление этого элемента сжатия как совокупности двух каскадов компрессора (один - от входа до места отбора, второй - от места отбора до выхода) со своими собственными независимыми от величины отбора характеристиками может привести к заметным погрешностям в определении интегральных характеристик силовой установки с ТРТД. В связи с этим проблема адекватного задания характеристик такого адаптивного вентилятора при расчете параметров ТРТД приобретает значительную актуальность.

Данная работа посвящена исследованию возможной деформации характеристик обеих групп ступеней: первой, состоящей из расположенных до места отбора ступеней, и второй, включающей ступени компрессора за местом отбора¹.

1 Физические основы изменения характеристики компрессора

Отбор воздуха из промежуточной ступени вентилятора по влиянию на характеристику этого каскада и положение на ней рабочей точки полностью аналогичен перепуску воздуха из тракта компрессора высокого давления (КВД).

¹ Понятие «каскад» используется далее в тексте намеренно в значении «набор ступеней, механически соединенных между собой и работающих как единый модуль», таким образом сохраняются привычные термины «каскад компрессора», «каскад вентилятора» и аналогичные.

Подобные системы на КВД применяются уже более 70 лет (впервые применен на АМТКРД-01 Микулина [18]). Профессор д.т.н. Ю.Н. Нечаев в [19] описал основы влияния отбора воздуха из проточного тракта компрессора на режимы работы его ступеней. Аналогичные результаты приводятся в [20-22].

Рассмотрим, как меняется линия согласования ступеней многоступенчатого компрессора при изменении приведенной частоты вращения ротора $n_{пр}$. На рис. 1 приведены характеристики первой (а) и последней (б) ступеней компрессора. Линия ВАС соответствует режиму работы ступени, близкому к оптимальному. При уменьшении $n_{пр}$ первая ступень, в которой снижается расход воздуха, переходит в левую ветвь характеристики (точка B_1), что снижает КПД ступени и ее напор и в принципе может привести к помпажному режиму. В последней ступени при снижении $n_{пр}$ рабочая точка перейдет на правую ветвь характеристики (точка B_k) из-за увеличения расхода воздуха. При этом КПД и степень повышения полного давления падают. При увеличении $n_{пр}$ отклонение рабочих точек будет прямо противоположным. В первой ступени рабочая точка отклонится вправо (точка C_1), а в последней ступени - влево по характеристике (точка C_k).

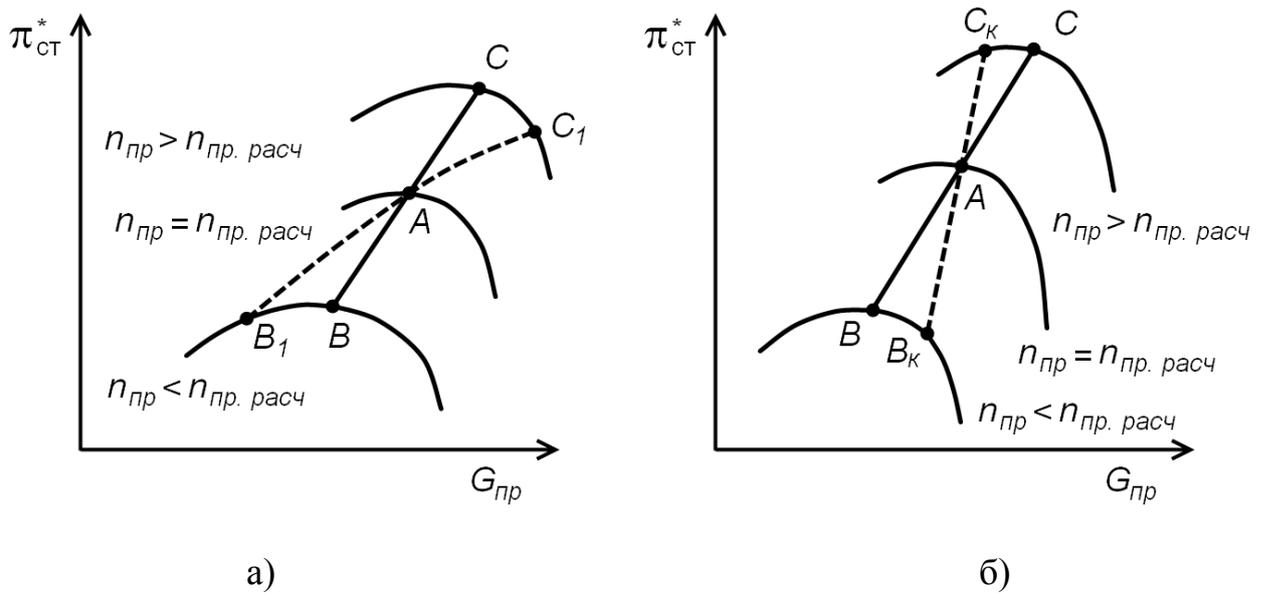


Рис. 1. Характеристики ступеней при $n_{пр} = var$:

а – первая ступень, б - последняя ступень

При дросселировании многоступенчатого компрессора при постоянной частоте вращения также происходит рассогласование режимов работы его отдельных ступеней. В результате уменьшения физического расхода воздуха (или приведенного расхода воздуха при равных давлении и температуре на входе в ступень, точка C на рис. 2а), а значит, и осевой скорости потока (рис. 3а) углы атаки на первых ступенях при сохранении окружной скорости увеличиваются. На последних же ступенях углы атаки уменьшаются вследствие роста приведенного расхода воздуха (точка C на рис. 2б) в связи со снижением давления воздуха на входе в ступень, что приводит к увеличению осевой скорости потока (рис. 3б).

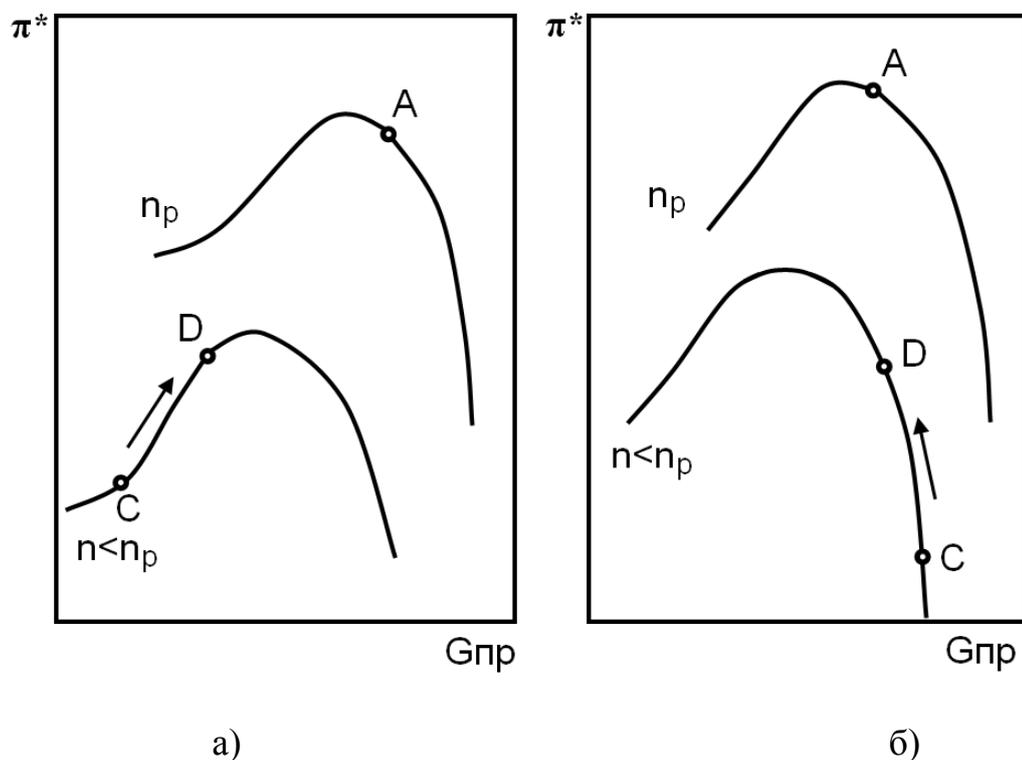


Рис. 2. Характеристики первой (а) и последней (б) ступеней многоступенчатого осевого компрессора

Для первых ступеней компрессора (до места отбора воздуха) в пределе это может приводить к возникновению срыва на спинке лопаток, как это показано на рис. 3а. При организации дополнительного отбора воздуха углы атаки на первых ступенях (перед отбором) уменьшаются, приближаясь к расчетным, так как увеличивается осевая скорость потока вследствие роста физического (и приведенного) расхода воздуха (точка D на рис. 2а). Таким образом, обтекание лопаточных венцов улучшается, что приводит к росту степени повышения давления и КПД этих ступеней.

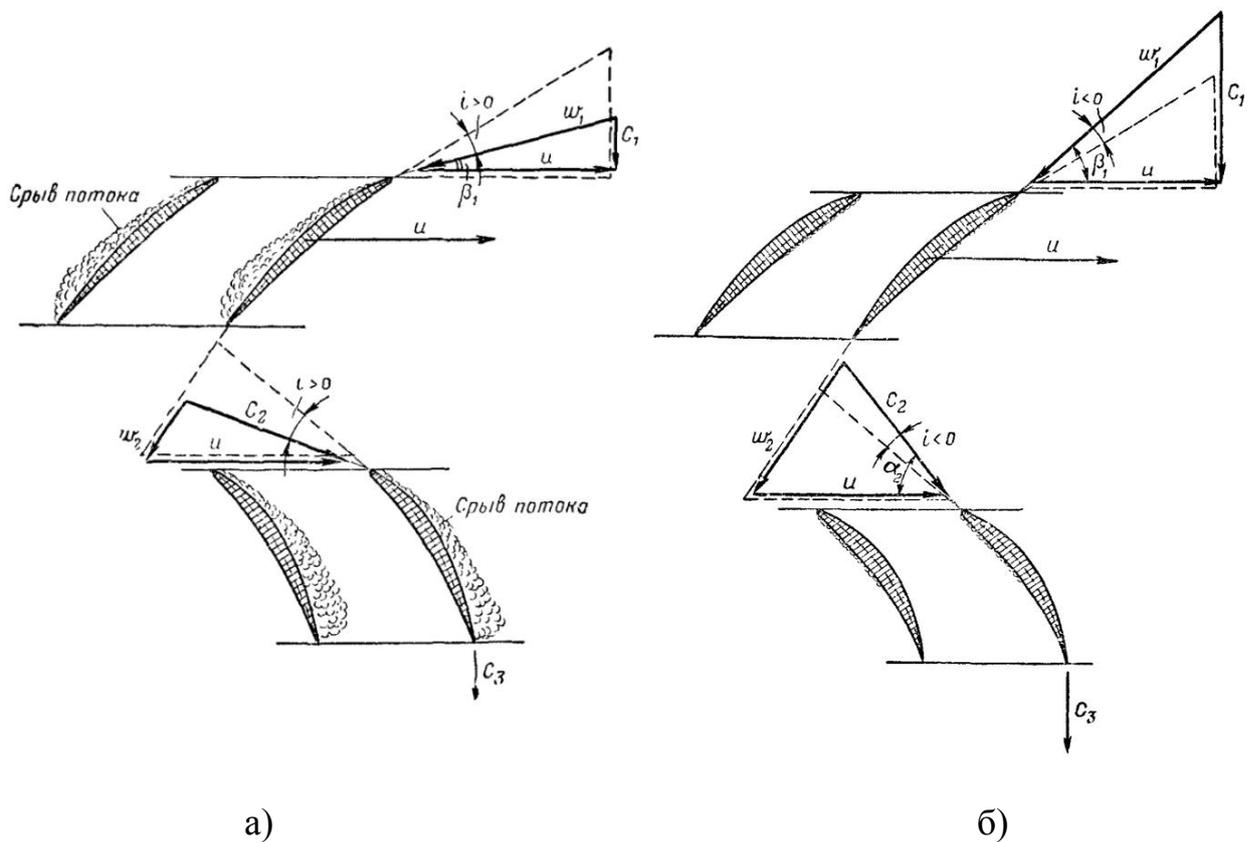


Рис. 3. Треугольники скоростей первой (а) и последней (б) ступени осевого многоступенчатого компрессора

При отборе воздуха на последних ступенях (после места отбора) из-за повышения давления поступающего воздуха и перераспределения расхода воздуха между отбором и основным потоком приведенный расход снижается (точка D на рис. 2б), углы атаки увеличиваются, приближаясь к расчетным. В результате обтекание лопаточных венцов так же улучшается.

2 Расчетные исследования компрессора с отбором рабочего тела из промежуточной ступени

В качестве объекта исследования был выбран модельный трехступенчатый вентилятор с современным уровнем нагруженности ступеней и показателей эффективности, у которого осуществлялся отбор воздуха в количестве до $\delta G_{отб} = 15\%$ (от расхода на входе) последовательно сначала от первой, а затем от второй ступени (в обоих случаях - за направляющим аппаратом в области периферии за лопаткой) на трех характерных уровнях частоты вращения, соответствующих максимальному ($\bar{n}_{np} = 1$), крейсерскому ($\bar{n}_{np} = 0,85$) и глубоко пониженному режиму ($\bar{n}_{np} = 0,6$).

На расчетном режиме рассматриваемого вентилятора с частотой вращения, соответствующей $\bar{n}_{np} = 1$, в наилучшей степени согласуются режимы работы его ступеней, поэтому любой отбор воздуха из проточного тракта неизбежно приводит к рассогласованию режимов работы ступеней и, как следствие, к снижению коэффициента полезного действия последующих за местом отбора ступеней.

При отборе воздуха за первой ступенью (рис. 4 и 5) напорная характеристика этой ступени практически не изменяется (имеет место лишь «более вертикальное» протекание в ее верхней части), то же касается и протекания КПД («расслоение» не более 1%). Характеристики же следующей за местом отбора группы ступеней (2 и 3 ступень) деформируются в большей степени: левая ветка напорной характеристики имеет значительно более крутое падение с заметным снижением в этой области и значения коэффициента полезного действия $\eta^*_{2-3ст}$.

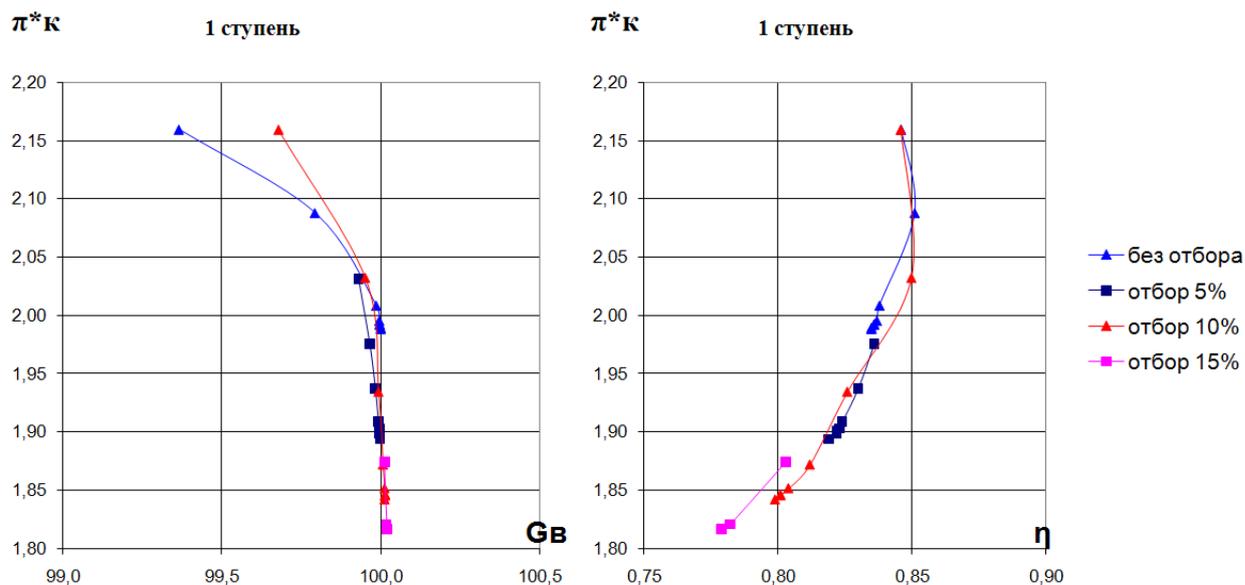


Рис. 4. Характеристики первой ступени при различных отборах воздуха из-за первой ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 1$

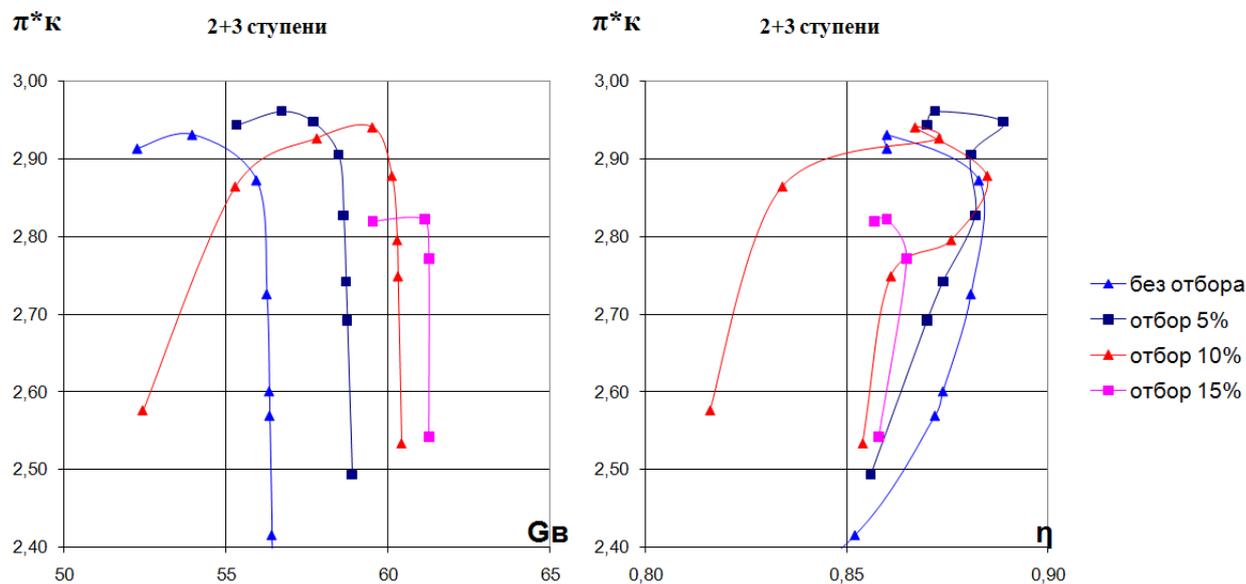


Рис. 5. Характеристики второй и третьей ступеней при различных отборах воздуха из-за первой ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 1$

Увеличение отбора воздуха из-за первой ступени усиливает перечисленные выше тенденции. Интегрально для всего вентилятора это еще сильнее снижает КПД и запасы устойчивой работы.

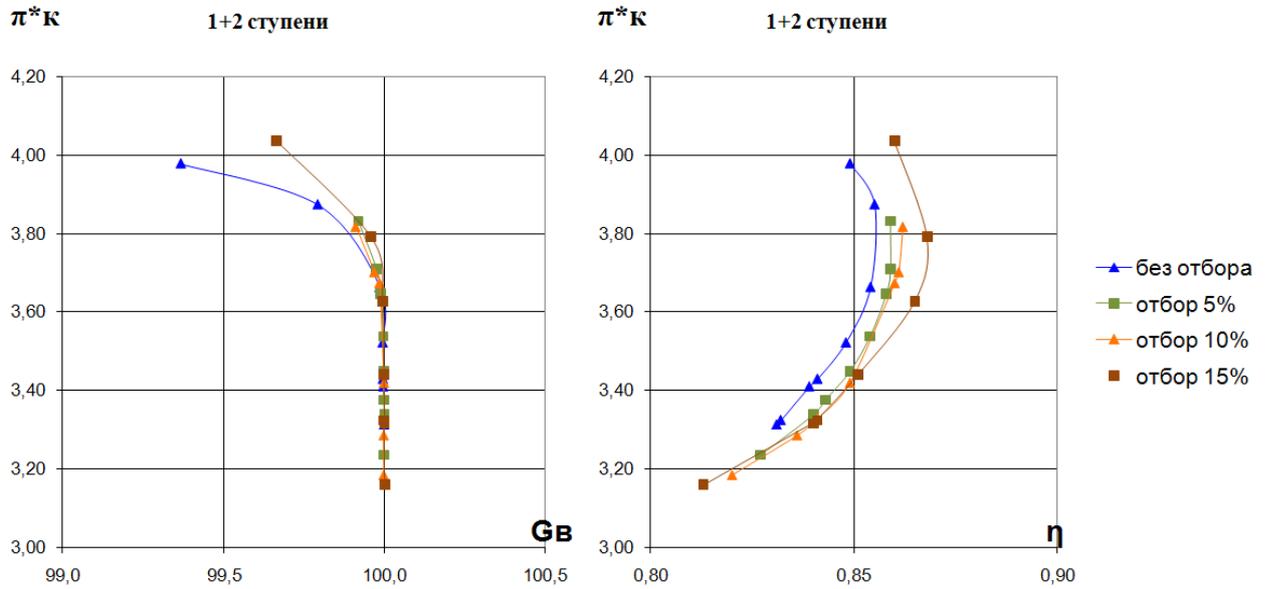


Рис. 6. Характеристики 1-2 ступеней при различных отборах воздуха из-за второй ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 1$

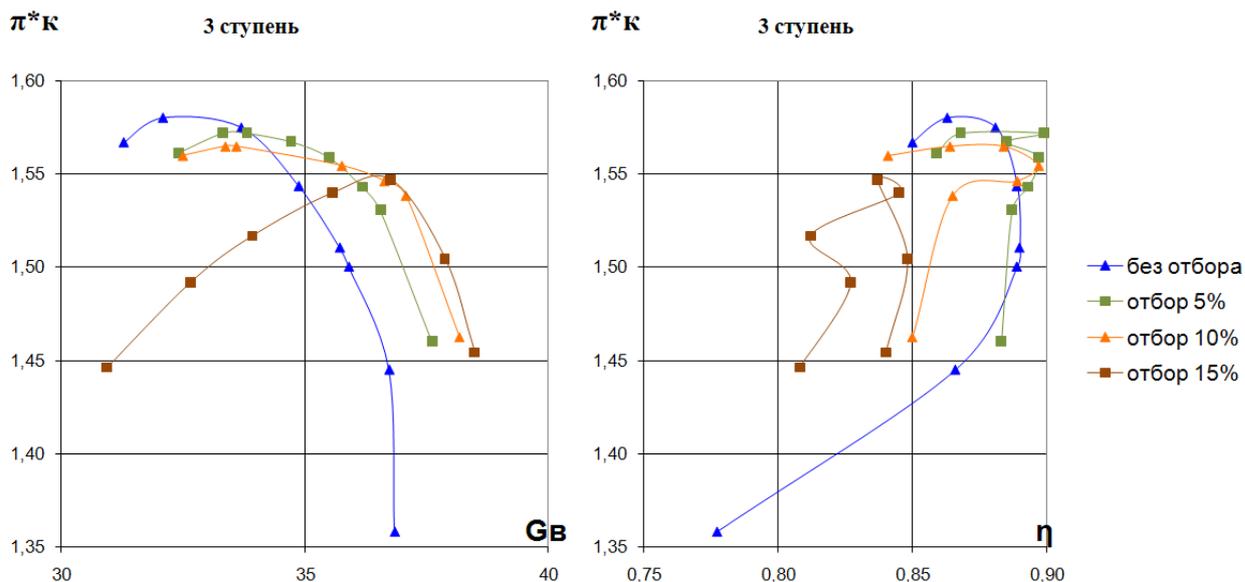


Рис. 7. Характеристики третьей ступени при различных отборах воздуха из-за второй ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 1$

При отборе воздуха за второй ступенью рассматриваемого вентилятора характеристика первой группы ступеней (до места отбора) меняется аналогично первому случаю, хотя и в несколько большей степени (рис. 6). Так, линии протекания КПД «расслаиваются» в среднем на 1,5-2%, причем при увеличении отбора воздуха $\eta^*_{1-2ст}$ растет. Что касается характеристики третьей ступени (за местом отбора), то увеличение углов атаки из-за уменьшения расхода воздуха в ней несколько приводит к росту степени повышения давления (компенсируя падение $\pi^*_{к1-2ст}$ вследствие условного «открытием дросселя» за второй ступенью) и заметно снижает $\eta^*_{3ст}$ и запас газодинамической устойчивости (рис. 7).

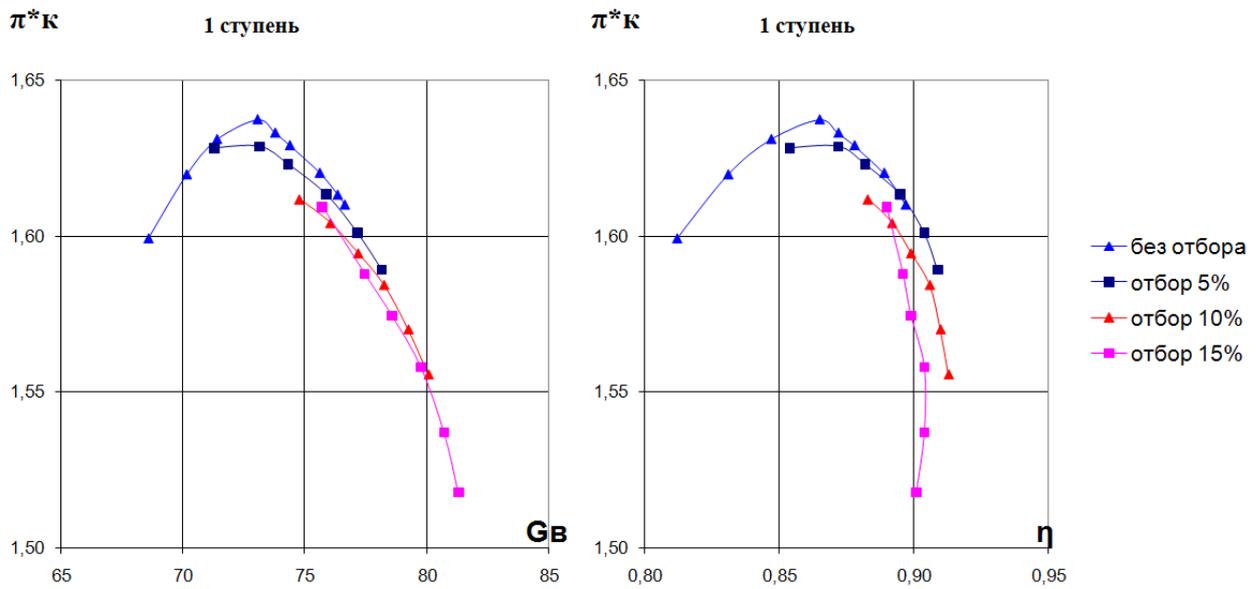


Рис. 8. Характеристики первой ступени при различных отборах воздуха из-за первой ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,85$

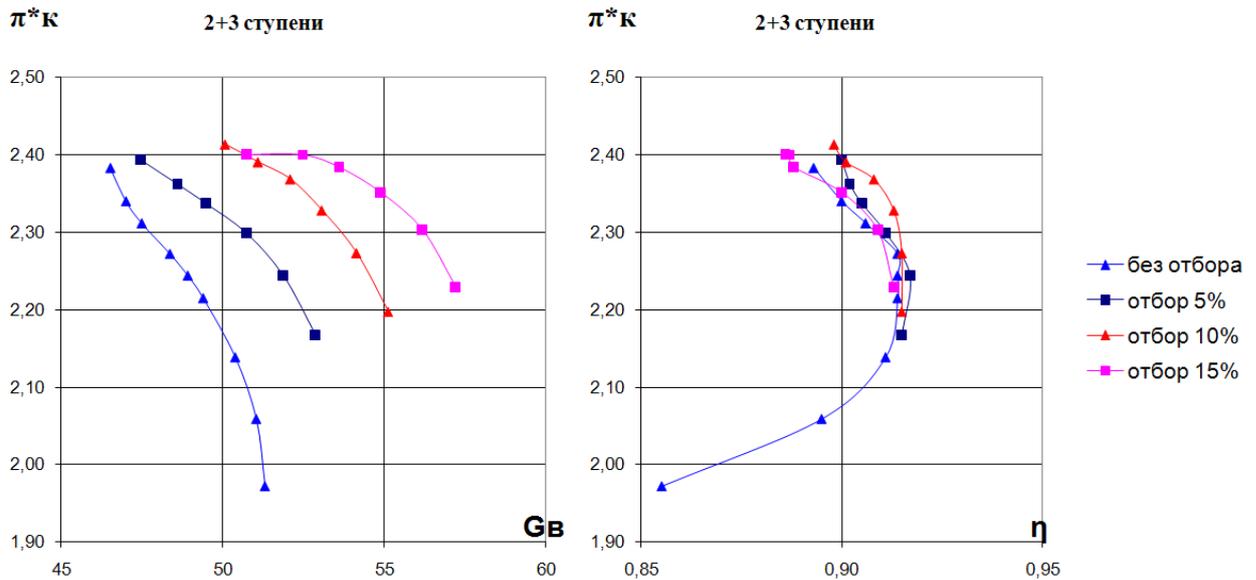


Рис. 9. Характеристики 2-3 ступеней при различных отборах воздуха из-за первой ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,85$

При частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,85$ в случае отбора воздуха за первой ступенью (рис. 8) заметного расслоения напорных веток и линий протекания КПД первой

ступени не наблюдается («расслоение» КПД составляет не более 1,5%, причем увеличение отбора воздуха приводит к снижению $\eta^*_{1ст}$). Что касается характеристики второй группы ступеней (рис. 9), расположенных за местом отбора, то здесь имеется значительное расслоение напорных веток (до 10% увеличения расхода воздуха при $\delta G_{отб}=15\%$, то есть $\sim 0,6-0,7\%$ на каждый процент отбора) при практически неизменном протекании $\eta^*_{2-3ст}$. Такое изменение характеристик можно объяснить, с одной стороны, отсутствием запираания второй группы ступеней в области рабочих режимов (смещение напорных веток при открытии перепуска), а с другой, оптимальностью режимов работы ее ступеней в области максимальных КПД всего вентилятора $\eta^*_в$ в целом, а также второй и третьей ступени, в частности.

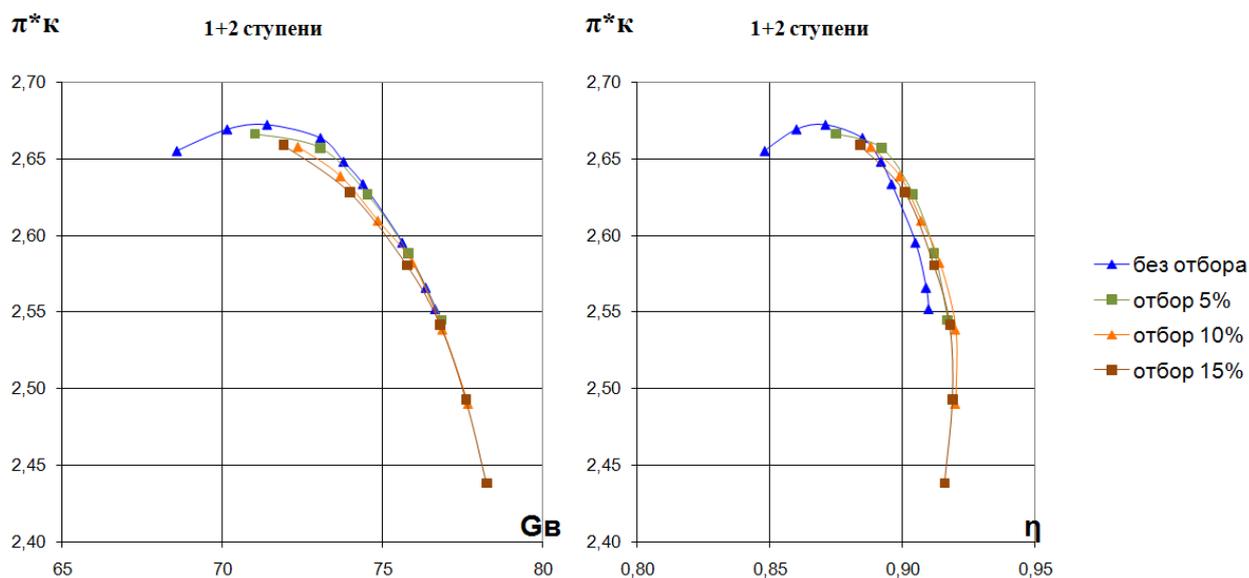


Рис. 10. Характеристики 1-2 ступеней при различных отборах воздуха из-за второй ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,85$

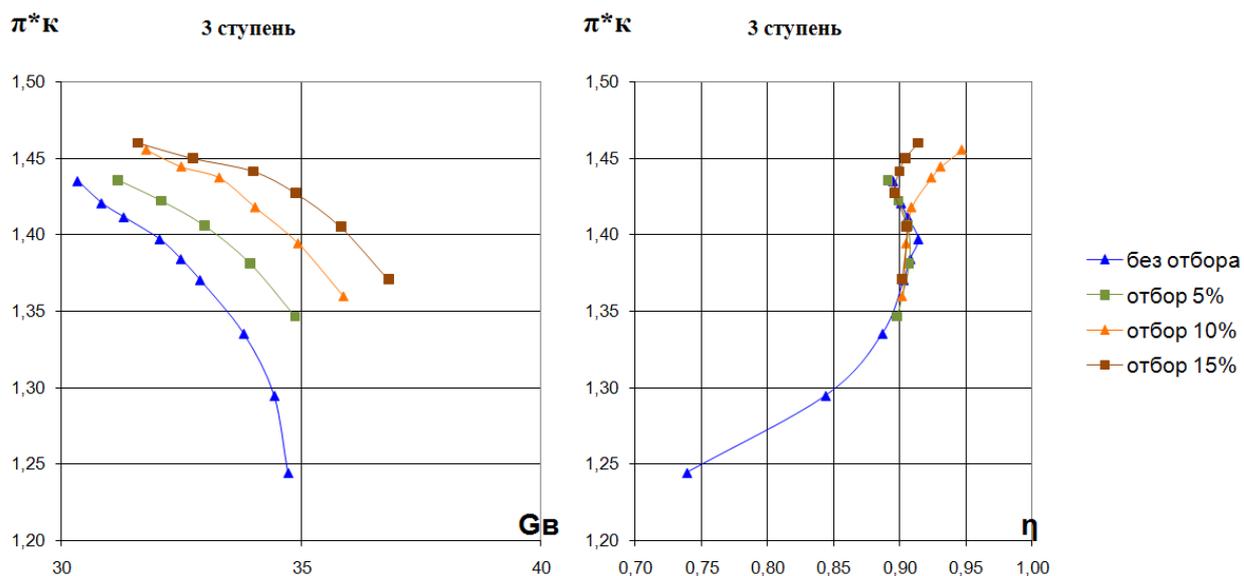


Рис. 11. Характеристики третьей ступени при различных отборах воздуха из-за

второй ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,85$

При отборе воздуха за второй ступенью картина аналогичная (рис. 10 и 11): характеристика первой группы ступеней (до места отбора) практически не деформируется, в то время как характеристика третьей ступени, расположенной за местом отбора, изменяется значительно. Так, расслоение напорных веток составляет примерно 5-6% при $\delta G_{отб} = 15\%$ (то есть примерно 0,3-0,35% на каждый процент отбора воздуха).

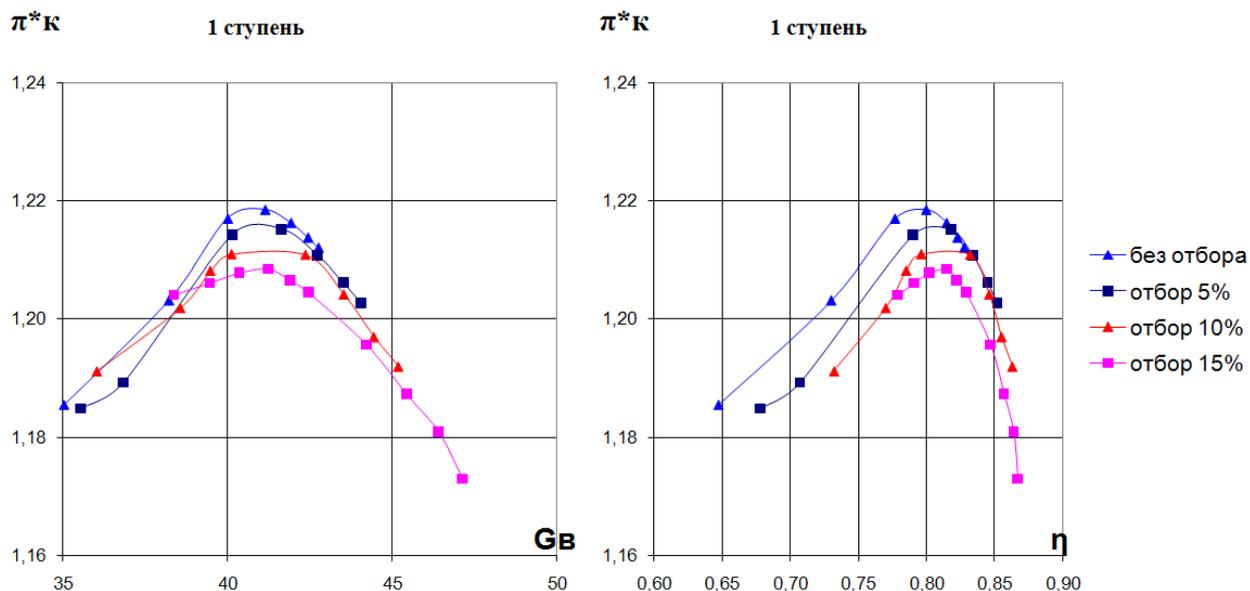


Рис. 12. Характеристики первой ступени при различных отборах воздуха из-за

первой ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,6$

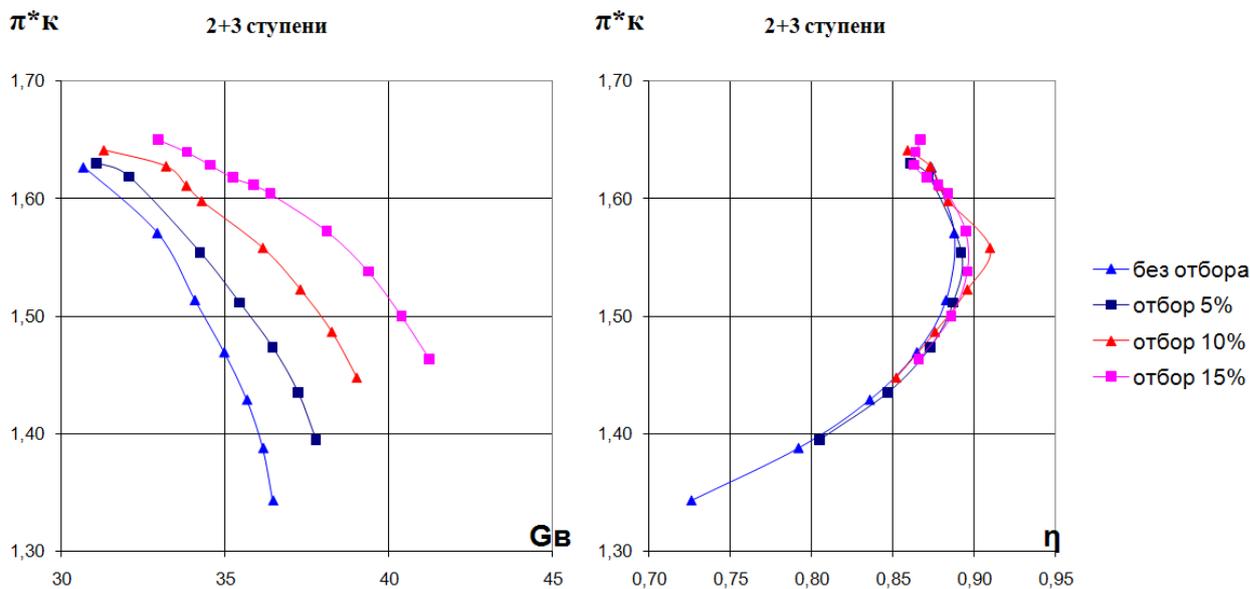


Рис. 13. Характеристики 2-3 ступеней при различных отборах воздуха из-за первой

ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,6$

При частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,6$ при отборе воздуха из первой ступени практически аналогично влиянию при $\bar{n}_{np} = 0,85$ (рис. 12 и 13) наблюдается

значительное расслоение напорных веток второй группы ступеней (примерно на 1,5% по расходу воздуха на каждый процент отбора), при этом на первой ступени в левой части ветки возрастает уровень $\eta^*_{1ст}$ ($\sim 0,5\%$ на каждый процент отбора), а в правой, рабочей части ветки уровень КПД при отборе практически не меняется.

При отборе воздуха за второй ступенью (рис. 14 и 15) описанные выше эффекты проявляются чуть в меньшей степени: расслоение напорных веток второй группы ступеней, следующей за местом отбора, составляет не более 1% по расходу воздуха на каждый процент отбора. При этом наблюдается увеличение уровня КПД $\eta^*_{1-2ст}$ во всем диапазоне режимов.

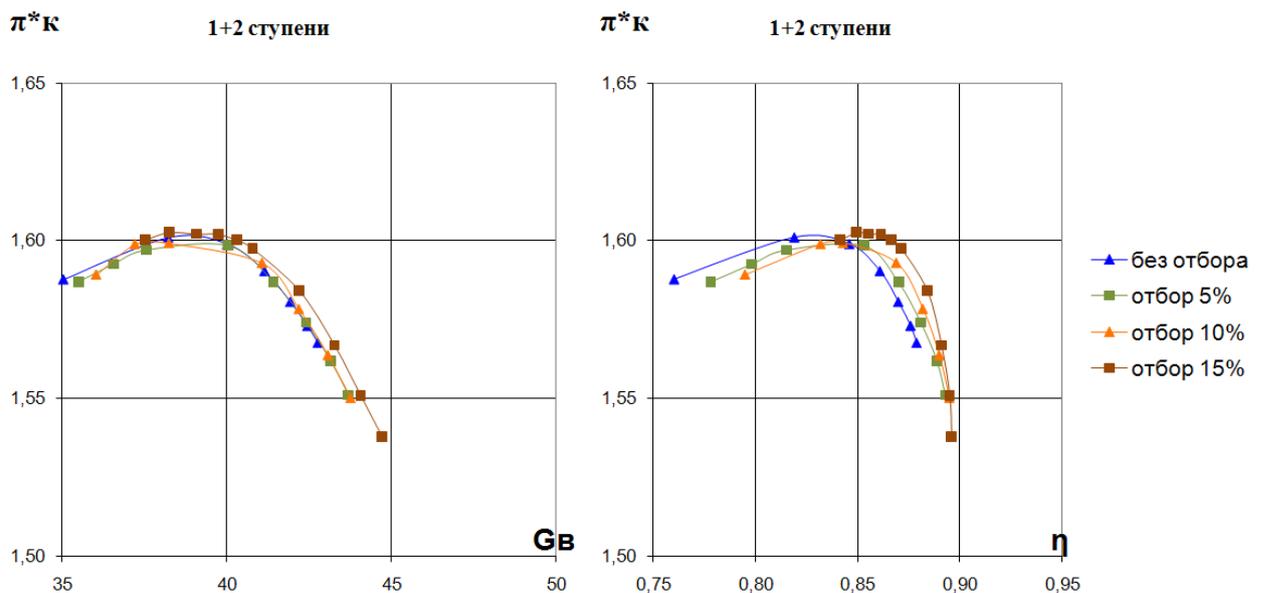


Рис. 14. Характеристики 1-2 ступеней при различных отборах воздуха из-за второй

ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,6$

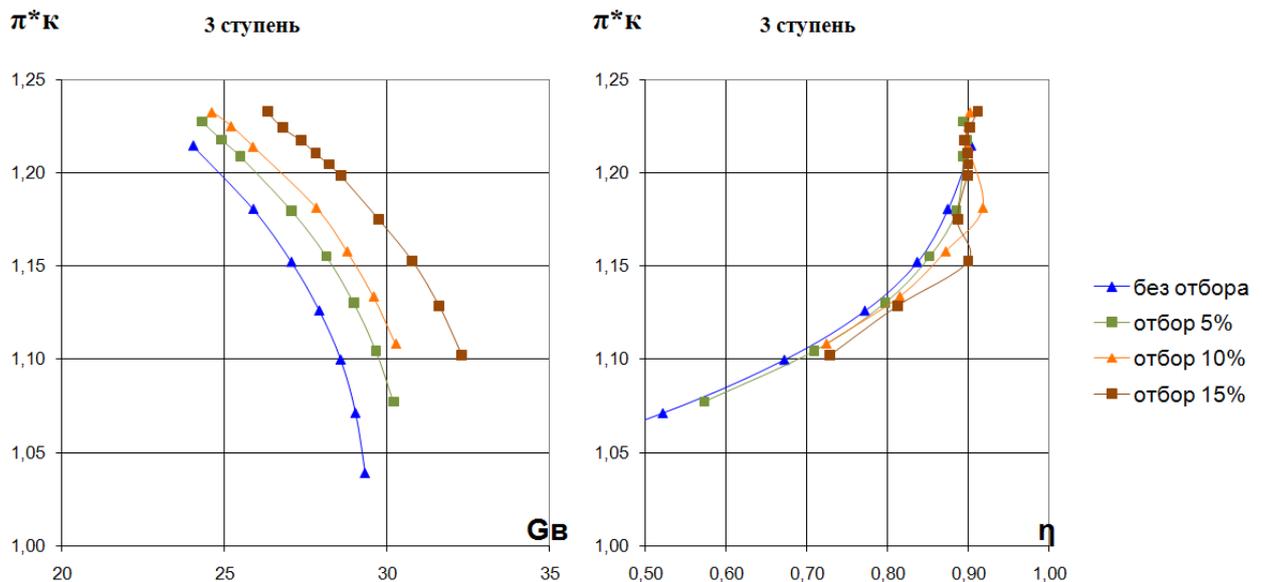


Рис. 15. Характеристики третьей ступени при различных отборах воздуха из-за второй ступени на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,6$

Таким образом, из приведенных выше результатов однозначно следует, что при изменении величины отбора воздуха $\delta G_{отб}$ (от 0 до 15% от расхода на входе) за первой или второй ступенью рассматриваемого вентилятора характеристика второй группы, состоящей из последующих за местом отбора ступеней, в значительной степени расслаивается в зависимости от величины $\delta G_{отб}$. Так, при отборе воздуха напорные ветки последующих ступеней смещаются вправо в сторону увеличения значения приведенного расхода; величина смещения зависит как от величины отбора, так и от значения приведенной частоты вращения. Наибольший эффект достигается на пониженной частоте вращения и наибольшем отборе воздуха, при этом при частоте вращения $\bar{n}_{np} = 1$ смещение практически отсутствует для всех значений отбора воздуха.

3 Экспериментальные исследования

Аналогичное влияние получено и в результате расчетно-экспериментального исследования опытного шестиступенчатого компрессора с современным уровнем нагруженности ступеней при отборе воздуха из-за его третьей ступени. На рис. 16-21 показаны характеристики группы его первых ступеней (с первой по третью) и группы последних ступеней (с четвертой по шестую) для трех характерных значений относительной приведенной частоты вращения ($\bar{n}_{np}=1$, $\bar{n}_{np}=0,9$ и $\bar{n}_{np}=0,8$) как в случае отсутствия отбора воздуха ($\delta G_{отб}=0$), так и при отборе воздуха в количестве $\delta G_{отб}=5\%$ и 10% от расхода на входе в компрессор.

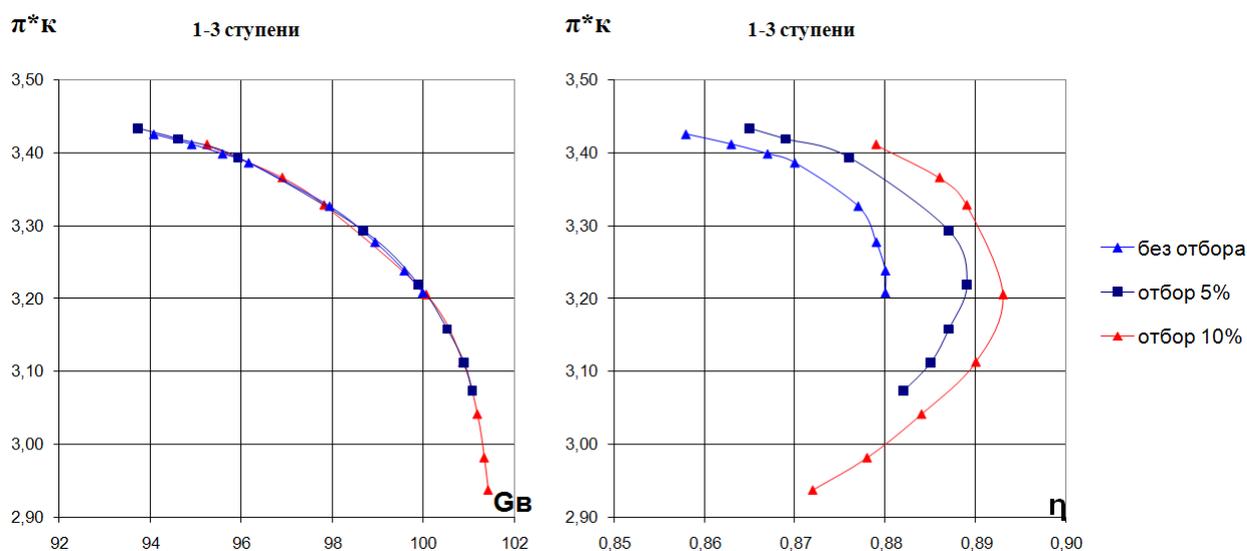


Рис. 16. Характеристики первой группы ступеней при различных отборах воздуха на частоте вращения $\bar{n}_{np}=1$

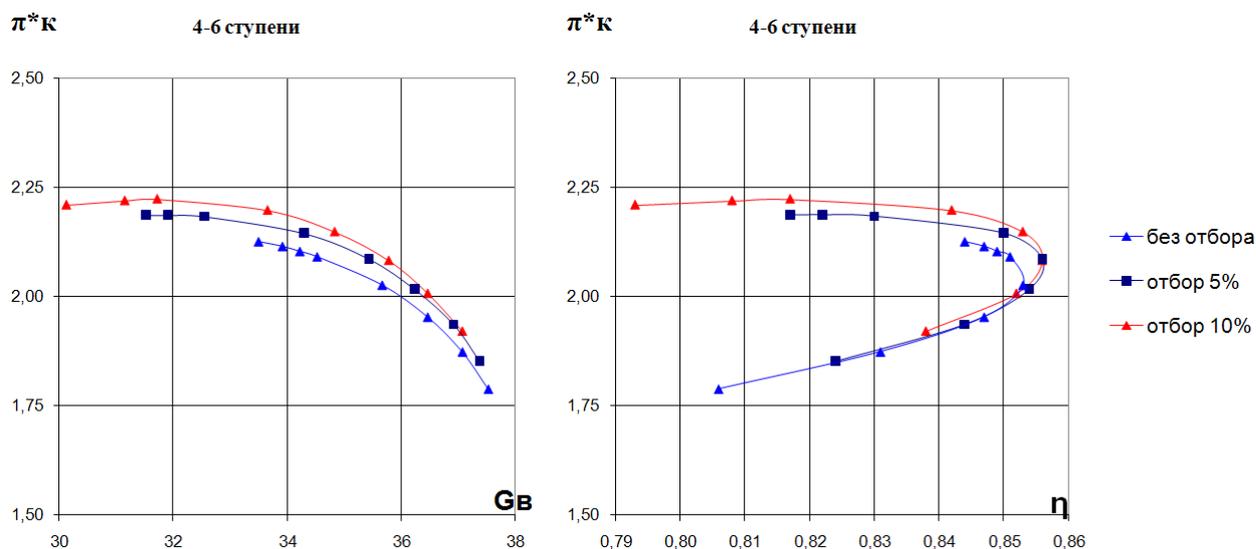


Рис. 17. Характеристики второй группы ступеней при различных отборах воздуха на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 1$

Расслоение напорных веток первой группы ступеней практически отсутствует во всем рассматриваемом диапазоне отборов воздуха $\delta G_{отб}$ и частот вращения \bar{n}_{np} . При этом уровень КПД обеих групп ступеней при отборе воздуха возрастает, в особенности для первой группы ступеней, для которой рост η^* составляет до 0,15% на каждый процент отбора $\delta G_{отб}$. Эта тенденция сохраняется во всем рассмотренном диапазоне частот вращения \bar{n}_{np} и объясняется тем обстоятельством, что исследуемый компрессор изначально проектировался с учетом отбора воздуха для охлаждения турбины и нужды летательного аппарата.

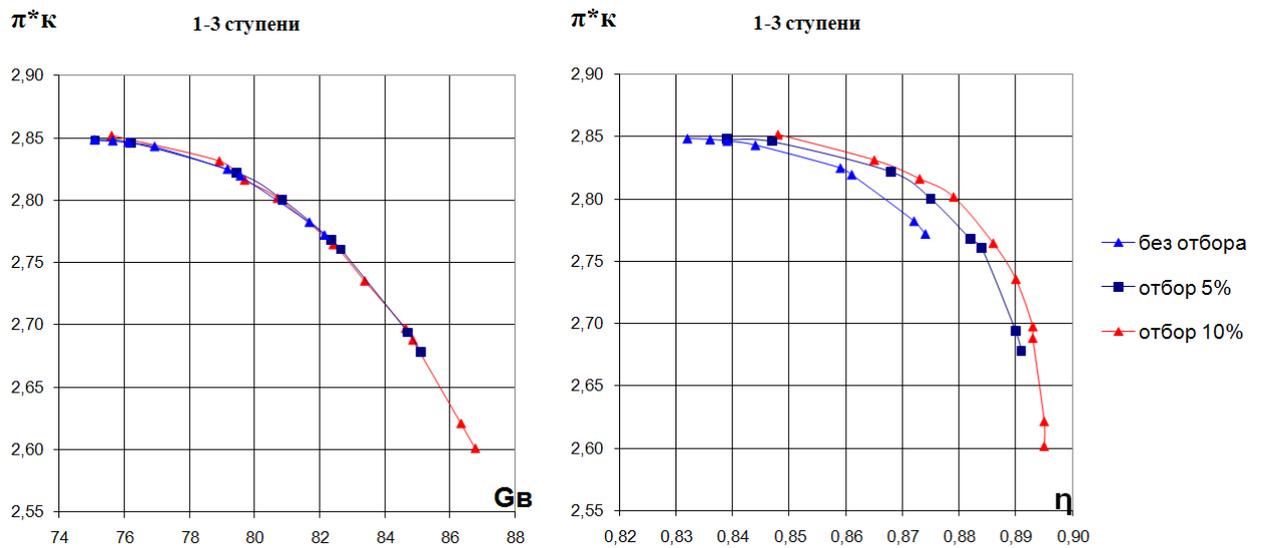


Рис. 18. Характеристики первой группы ступеней при различных отборах воздуха на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,9$

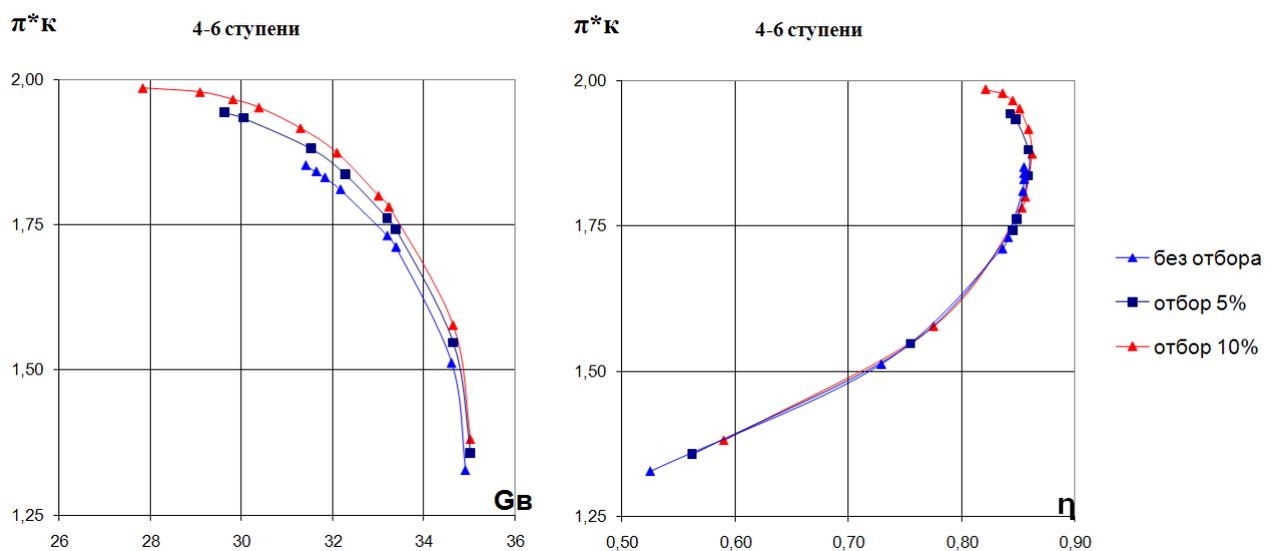


Рис. 19. Характеристики второй группы ступеней при различных отборах воздуха на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,9$

Расслоение напорных веток второй группы ступеней несколько слабее, чем в рассмотренном ранее вентиляторе, что может быть связано с более высоким значением суммарной степени повышения давления. Смещение напорных веток

примерно одинаково для всех значений частоты вращения и составляет $\sim 0,25 \dots 0,3\%$ на каждый процент отбора $\delta G_{\text{отб}}$.

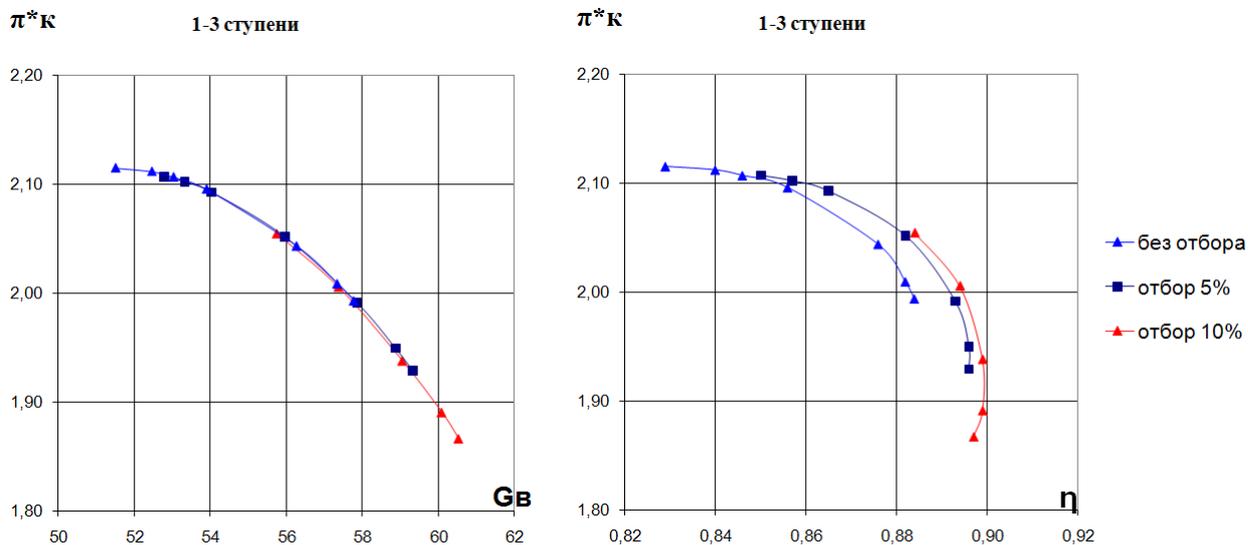


Рис. 20. Характеристики первой группы ступеней при различных отборах воздуха на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,8$

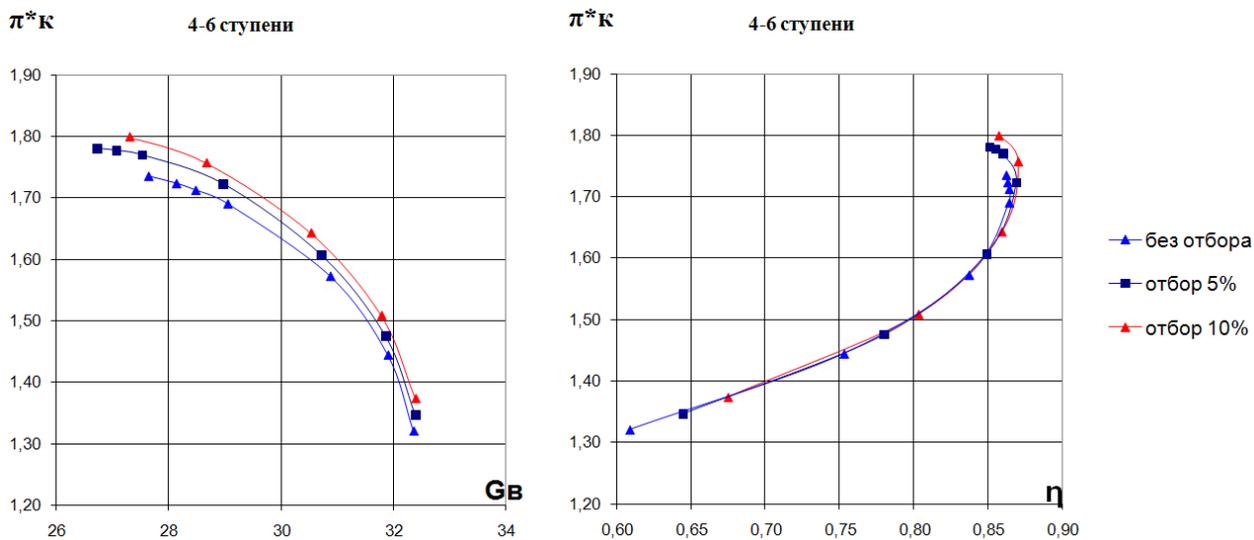


Рис. 21. Характеристики второй группы ступеней при различных отборах воздуха на частоте вращения $\bar{n}_{np} = 0,8$

Выводы

Из представленных результатов видно, что при отборе воздуха из промежуточной ступени компрессора при сохранении в практически недеформированном виде характеристики первой группы ступеней компрессора имеет место значительное расслоение характеристик второй группы ступеней, расположенных за местом отбора. В первую очередь это касается протекания напорных веток, причем с уменьшением значения приведенной частоты вращения компрессора это расслоение становится более заметным.

Отмеченное выше расслоение напорных веток второй, следующей за местом отбора, группы ступеней может быть объяснено следующим образом. При отборе части рабочего тела из проточной тракта многоступенчатого компрессора рабочая точка на характеристике первой группы ступеней смещается по напорной ветке вправо-вниз (или только вниз - в случае вертикальной ветки) на меньшие значения степени повышения давления, соответственно, обеспечивая меньшие уровни температуры поступающего на вход во вторую группу ступеней воздуха. Это обстоятельство приводит к смещению рабочей точки на характеристике второй группы ступеней в сторону больших приведенных значений расхода воздуха. Кроме того, к смещению рабочей точки в этом же направлении приводит и влияние неоднородного поля параметров на входе в эту группу ступеней, возникшего вследствие осуществления отбора воздуха в периферийной области лопаток.

Что касается общего воздействия отбора воздуха из проточного тракта на интегральные параметры компрессора, то в значительной степени оно зависит от того, «закладывался» ли этот отбор при его проектировании.

Если при проектировании компрессора он не был предусмотрен, как, например, в рассмотренном трехступенчатом компрессоре, то из-за рассогласования ступеней на режимах, близких к расчетным, отбор воздуха приводит к снижению его параметров. Отбор воздуха на пониженных режимах в зависимости от расположения рабочих точек на характеристиках отдельных ступеней может воздействовать по-разному. Так, например, в рассмотренном случае отбор воздуха на пониженных режимах смещает рабочую точку на характеристике первой ступени из глубокой левой ветки характеристики ближе к оптимуму, что и приводит к некоторому росту параметров компрессора.

Если отбор воздуха предусматривался изначально при проектировании, как в рассмотренном случае шестиступенчатого компрессора, то воздействие отбора для различных частот вращения ротора будет достаточно близким: увеличение количества отбираемого воздуха (естественно, до определенного предела) приводит к росту аэродинамических параметров по всем частотам вращения ротора.

Библиографический список

1. Ша М., Агульник А.Б., Яковлев А.А. Анализ результатов математического моделирования натекания дозвукового потока на профили лопаток в двухмерной постановке // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80297>
2. Leitner M.W., Zippel M., Staudacher S. The interaction of tip leakage flow with incoming flow in a compressor cascade // Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress - 2016, available at: <https://www.dglr.de/publikationen/2016/420023.pdf>

3. Merkl E. Ubr aero engines, technologien für die nächste triebwerksgeneration (enoval) // Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress - 2016, available at: <https://www.dglr.de/publikationen/2016/420025.pdf>
4. Grois A. Entwicklung eines numerischen simulationsverfahrens zur modellierung einer verdichterströmung in einem generischen zweiwelligen turbofan triebwerk // Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress - 2016, available at: http://www.dlrk2016.dglr.de/fileadmin/inhalte/veranstaltungen/dlrk/dlrk2016/DLRK2016_Programm_web.pdf
5. Druzhinin I., Rossikhin A., Mileshin V. Computational investigation of aerodynamic and acoustic characteristics of counter rotating fan with ultra high bypass ratio // 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics, 2017, ETC2017-146, available at: <https://www.euroturbo.eu/paper/ETC2017-146.pdf>
6. Thomas G. Sylvester, Robert J. Brown, Colin F. O'Connor. F-35B Lift Fan Inlet Development // AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress", 21 - 22 September 2011, Virginia Beach, VA, available at: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2011-6940>
7. A. Joksimović, S. Duplaa, Y. Bousquet, X. Carbonneau, N. Tantot. Local and global analysis of a variable pitch fan turbofan engine // 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics ETC12, April 3-7, 2017; Stockholm, Sweden, available at: <https://www.euroturbo.eu/paper/ETC2017-073.pdf>
8. Гуревич О.С., Гольберг Ф.Д., Зуев С.А., Бусурин В.И. Управление органами механизации компрессора газотурбинного двигателя с использованием его

математической модели // Труды МАИ. 2017. № 93. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=80286>

9. Sean T Ford. Aerothermodynamic cycle design and optimizatoin method for aircraft engines // A Thesis Presented to The Academic Faculty In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Masters of Science in the School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, December 2014, available at:
<https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/53006/FORD-THESIS-2014.pdf>

10. Guy Norris. USAF Confirms Sixth-Gen Fighter Engine Awards // Aerospace Daily & Defense Report, 2016, available at: <http://aviationweek.com/defense/usaf-confirms-sixth-gen-fighter-engine-awards>

11. Ya Lyu, Hailong Tang, Min Chen. A Study on Combined Variable Geometries Regulation of Adaptive Cycle Engine during Throttling // MDPI, Applied Sciences, 2016, available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/6/12/374/pdf>

12. Joseph W. Connolly, David Friedlander, George Kopasakis. Computational Fluid Dynamics Modeling of a Supersonic Nozzle and Integration into a Variable Cycle Engine Model // 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Propulsion and Energy Forum, July 28-30, 2014, Cleveland, available at:
<https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2014-3687>

13. George Kopasakis, Joseph W. Connolly, Jonathan Seidel. Propulsion System Dynamic Modeling of the NASA Supersonic Concept Vehicle for AeroPropulsoServoElasticity // 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Propulsion and Energy Forum, July 28-30, 2014, Cleveland, available at:
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160001690.pdf>

14. Дрыгин А.С., Кизеев И.С., Эзрохи Ю.А. Анализ возможностей повышения крейсерской топливной экономичности многорежимного двигателя с третьим контуром // Наука и Образование. 2017. № 3. С. 116 - 136, doi: 10.7463/0317.0000964
15. Кикоть Н.В., Кретинин Г.В., Лещенко И.А., Федечкин К.С. Исследование топливной экономичности силовой установки многорежимного самолета с трехконтурным двигателем // Труды ХЛП академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева (Москва, 23-26 января 2018). - М.: МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2018. С. 293.
16. Лещенко И.А., Шмотин Ю.Н., Федечкин К.С., Кикоть Н.В. Исследование эффективности независимо управляемого 3-го контура в силовой установке многоцелевого самолета // Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века». Тезисы докладов. (Москва, 24-27 ноября 2015) - М.: ЦИАМ, 2015. С. 77 - 79.
17. Эзрохи Ю.А., Дрыгин А.С., Кизеев И.С., Селиванов О.Д., Фокин Д.Б. Перспективы применения технологии третьего контура в условиях сверхзвукового полета // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91846>
18. Берне Л.П. Как все начиналось. - М.: Двигатель, 2013. - 464 с.
19. Казанджан П.К. и др. Теория реактивных двигателей. - М: Военное издательство Минобороны СССР, 1955. - 296 с.
20. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. - М.: Машиностроение, 1970. - 614 с.
21. Антонюк Л.М., Марусенко В.С. Теория газотурбинных двигателей. – М.: Изд-во МАИ, 1998. Ч.1. - 163 с.

22. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М., Котовский В.Н., Полев А.С. Теория авиационных двигателей. - М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2005. Ч. 1. - 366 с.