

УДК 621.311.238

**ПОВЫШЕНИЕ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ГТУ И ПГУ  
INCREASING THE POWER GENERATION OF GTUS AND CCGTS**

Т. А. Сиваков, Н. С. Покровский

Научный руководитель – Ю.П. Ярмольчик, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

yarmolchik@bntu.by

T. Sivakov, N. Pokrovsky

Supervisor – Yu. Yarmolchik, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в статье идет речь о повышении выработки электроэнергии ГТУ и ПГУ.*

***Abstract:** the article deals with the increase in electricity generation of GTUs and CCGTs.*

***Ключевые слова:** ГТУ, ПГУ, КПД, впрыск, электроэнергия.*

***Keywords:** GTU, CCGT, efficiency, injection, electricity.*

**Введение**

В данной работе рассмотрены способы повышения выработки электроэнергии путем впрыска воды в воздух перед компрессором, а также путем впрыска водяного пара в газовый поток в сочетании с уже известными методами повышения эффективности.

**Основная часть**

«Работы по изучению эффективности впрыска в компрессор ГТУ начаты еще в 60-е годы. Впервые был сделан термодинамический анализ эффекта впрыска воды на входе в компрессор, проведены испытания компрессоров с впрыском воды в полупромышленных и промышленных (в НПО «Тулачермет») условиях. В опытах для впрыска использовали дистиллированную воду» [1].

Внедрение данного способа сдерживается из-за опасений, что проточная часть компрессора будет подвергаться воздействию эрозии капельной влагой, которая исчезает в зоне, где температура сжимаемого воздуха превышает температуру насыщения водяного пара при давлении в данной зоне.

В результате термодинамического анализа эффекта влажного сжатия, было выяснено, что при сухом сжатии на привод компрессора расходуется до 67% мощности турбины, тогда как при влажном сжатии с впрыском до 8% влаги от массы циклового воздуха расходуется 30-35% мощности турбины, полезная мощность турбины увеличивается практически в 2 раза [1].

Другим способом увеличения выработки мощности ГТУ является впрыск пара в газоздушный тракт, получаемого в котле-утилизаторе. Значения энтальпии парогазовой смеси значительно больше чем у пара и газа, используемых в качестве рабочих тел отдельно в газовых и паровых турбинах.

Атмосферный воздух сжимается компрессором и подается в камеру сгорания, в которой происходит сгорание природного газа. Обессоленная вода под давлением, превышающим давление в газовом потоке на 25 – 30%, пройдя через поверхности нагрева котла утилизатора, поступает в виде слабо перегретого пара в камеру сгорания. В результате смешения газа и пара в камере сгорания объем рабочего тела увеличивается при неизменной мощности воздушного компрессора, что приводит к значительному повышению полезной мощности турбины. Для повышения температуры впрыскиваемого пара до начальной температуры газов приходится увеличивать количество сжигаемого в камере сгорания топлива, что компенсируется ростом мощности газовой турбины. Таким образом, в ГТУ с впрыском пара повышается не только мощность, но и КПД установки. Увеличение на 1% пароводяного рабочего тела в газовой турбине за счет подачи пара, генерируемого в котле-утилизаторе, повышает электрический КПД установки на 2 – 3% при одновременном увеличении мощности на 6 – 7% [2].

Однако, при значительной доле впрыскиваемого пара запас по помпажу компрессора снижается до предельно малых значений. Экспериментально установлена возможность нормальной работы камеры сгорания с добавкой пара не более 7 – 10% от расхода воздуха. В то же время энергоресурс отработанных в турбине газов позволяет вырабатывать в котле-утилизаторе современных ГТУ более 20 – 25% пара относительно расхода воздуха. Поэтому часть пара подается непосредственно в зону горения камеры сгорания, а другая часть – впрыскивается в газоздушный тракт перед газовой турбиной. Часть пара может использоваться для охлаждения сопловых лопаток первых ступеней газовой турбины [2].

Нельзя не отметить, что впрыск пара в камеру сгорания негативно сказывается на температуре в зоне горения топлива. Это снижает полноту сгорания топлива, что увеличивает образование окиси углерода CO в дымовых газах. Снижается устойчивость процесса горения и увеличивается вероятность вибрационного горения топлива. Проявление последнего может привести к разрушению элементов камеры сгорания.

Рассмотрим схему (рисунок 1) где реализованы следующие методы повышения эффективности: ступенчатое сжатие воздуха с промежуточным охлаждением; регенерационный подогрев воздуха; ступенчатое расширение с промежуточным подводом тепла как в последовательной, так и в параллельной камерах сгорания; перерасширение продуктов сгорания и впрыск водяного пара из котлов-утилизаторов в газовый поток.

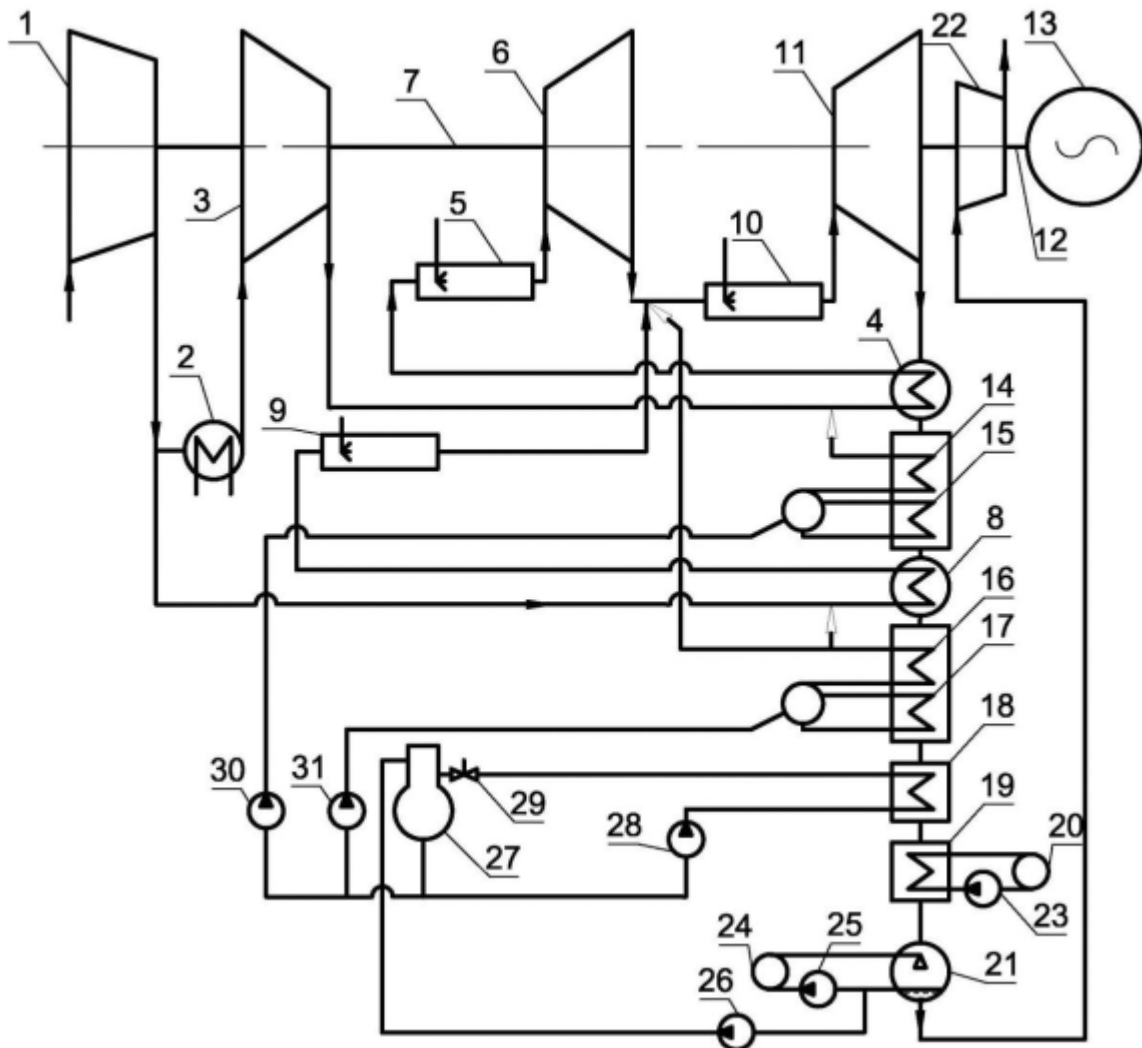


Рисунок 1 - Обобщенная тепловая схема ГТУ и ПГУ смешения

1 – компрессор низкого давления (КНД), 2 – охладитель воздуха (ОВ), 3 – компрессор высокого давления (КВД), 4 – регенератор высокого давления (РВД), 5 – камера сгорания №1 (КС1), 6 – турбина высокого давления (ТВД), 7 – вал ТВД, 8 – регенератор низкого давления (РНД), 9 – камера сгорания №2 (КС2), 10 – камера сгорания №3 (КС3), 11 – турбина низкого давления (ТНД), 12 – вал ТНД, 13 – электрогенератор, 14 – пароперегреватель №1 (ПП1), 15 – паровой котелутилизатор №1 (ПКУ1), 16 – пароперегреватель №2, 17 – паровой котелутилизатор №2 (ПКУ2), 18 – экономайзер подпиточной воды (ЭПВ), 19 – водогрейный котел-утилизатор (ВКУ), 20 – тепловой потребитель, 21 – контактный газоохладитель (ГО), 22 – компрессор газовый, 23 – сетевой электронасос, 24 – аппарат воздушного охлаждения, 25 – циркуляционный электронасос, 26 – конденсатный электронасос, 27 – деаэратор перегретой воды, 28 – подпиточный электронасос, 29 – редукционный клапан, 30 – питательный электронасос №1, 31 – питательный электронасос №2.

ПГУ смешения, выполненная по обобщенной схеме, работает следующим образом. Атмосферный воздух поступает в компрессор низкого давления 1, где повышается его давление. Затем он разделяется на два потока. Первый из них, пройдя воздухоохладитель 2, направляется в компрессор высокого давления 3. После чего поток воздуха смешивается с потоком пара из пароперегревателя парового котла-утилизатора 14. Далее паровоздушная смесь поступает в регенератор высокого давления 4, который представляет

собой теплообменный аппарат поверхностного типа. Подогретая паровоздушная смесь подается в основную камеру сгорания 5, в которой сжигается газообразное топливо. И основной камеры сгорания 5 продукты сгорания попадают в турбину высокого давления 6, являющуюся приводом для компрессоров низкого и высокого давлений 1, 3. Второй поток сжатого воздуха после компрессора низкого давления 1 смешивается с потоком пара из пароперегревателя парового котла-утилизатора 16. Далее паровоздушная смесь поступает в регенератор низкого давления 8, который представляет собой теплообменный аппарат поверхностного типа. В регенератор низкого давления 8 после парового котла-утилизатора 15 также направляются отработавшие газы, которые отдают часть своего тепла паровоздушной смеси. Подогретая паровоздушная смесь направляется в параллельную камеру сгорания 9, в которой сжигается газообразное топливо. Продукты сгорания из параллельной камеры сгорания 9 смешиваются с продуктами сгорания из турбины высокого давления 6, куда подается еще один поток пара из пароперегревателя парового котла-утилизатора 16 и поступают в последовательную камеру сгорания 10, в которой сжигается газообразное топливо. Откуда продукты сгорания направляются в турбину низкого давления 11, которая является приводом для электрогенератора 13 и газового компрессора 22. Выхлопные газы, поступающие из турбины низкого давления 11, проходят регенератор высокого давления 4, где подогревают паровоздушную смесь перед основной камерой сгорания 5. Из регенератора высокого давления 4 выхлопные газы поступают последовательно в пароперегреватель парового котла-утилизатора 14 и в сам котел-утилизатор 15, где отдают тепло пару в пароперегревателе и его котловой воде. Выхлопные газы, поступающие из парового котла-утилизатора 15, проходят регенератор низкого давления 8, где подогревают паровоздушную смесь перед параллельной камерой сгорания 9. Из регенератора низкого давления 8 выхлопные газы поступают последовательно в пароперегреватель парового котла-утилизатора 16 и в сам котел-утилизатор 17, где отдают тепло пару в пароперегревателе и его котловой воде. Выхлопные газы из парового котла-утилизатора 17 проходят экономайзер подпиточной воды 18, где отдают тепло подпиточной воде. Из экономайзера подпиточной воды 18 выхлопные газы поступают в водогрейный котел-утилизатор 19, подогревая сетевую воду, которая сетевым электронасосом 23 направляется к тепловому потребителю 20. Из водогрейного котла-утилизатора 19 выхлопные газы проходят контактный газоохладитель 21, где паровая составляющая потока конденсируется и смешивается с охлаждающей водой, которая циркуляционным электронасосом 25 подается в аппарат воздушного охлаждения 24, для понижения ее температуры. Из контактного газоохладителя 21 выхлопные газы направляются в атмосферу с помощью газового компрессора 22, который также поддерживает в утилизационной части установки разрежение. Часть потока охлаждающей воды, смешанной с конденсатом из контактного газоохладителя 21, конденсатным насосом 26 направляется в деаэрактор перегретой воды 27. В него также с помощью

подпиточного насоса 28 через экономайзер перегретой воды 18 подается поток перегретой воды, дозируемый редукционным клапаном 29. Деаэрированная вода из деаэратора перегретой воды 27 питательными электронасосами 30 и 31 подается в паровые котлы-утилизаторы 15 и 17 соответственно [2].

В результате проведения термодинамического анализа было установлено, что применение ступенчатого подвода теплоты в дополнительно установленной параллельной камере сгорания в схеме ПГУ с двухступенчатым сжатием воздуха и впрыском сухого насыщенного пара в регенераторы высокого и низкого давлений позволяет значительно увеличить полезную мощность установки до 56,76 МВт при эффективном КПД порядка 42% [2].

#### **Заключение**

Данные способы позволяют значительно увеличить выработку электроэнергии ГТУ и ПГУ, однако существуют пределы, в которых они проявляют свою эффективность. Для впрыска воды в атмосферный воздух перед компрессором пределом является 8 % от расхода воздуха, а для впрыска пара в газоздушный тракт – 7-10 % от расхода воздуха.

#### **Литература**

1. Способ повышения КПД парогазовой энергоустановки: пат №2334112 Российская Федерация, МПК F01K 23/02, F02C 6/00 / В.Н. Кириленко; заявитель – В.Н. Кириленко; заявл. 10.07.2006; опубл. 20.09.2008 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2008. – № 26. – С. 9.
2. Шапошников В.В. Повышение эффективности ГТУ и ПГУ путем совершенствования тепловых схем и оптимизации параметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / В.В. Шапошников – Краснодар, 2015 – 178 с.