

## **ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ВПРЫСКА ВОДЫ В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ НА ДАВЛЕНИЕ ПОЛУЧАЕМОЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ**

М. Н. Никитин

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Самарский государственный технический университет

**Рассмотрена возможность использования импульса потока воды в смесительных теплогенераторах. Приведен способ перегрева впрыскиваемой в поток дымовых газов воды. Указаны результаты анализа влияния температуры и давления впрыскиваемой воды на производительность теплогенератора и давление получаемой смеси. Представлена сравнительная характеристика теплогенераторов со свободным и направленным впрыском.**

Ключевые слова: смесительный теплогенератор, перегрев воды, парогазовая смесь, устройство впрыска, спиральный канал, давление парогазовой смеси, паропроизводительность.

Теплогенераторы с мгновенной подачей известны давно, однако широкое применение как в промышленности, так и в сельском хозяйстве начали находить совсем недавно. Их конструкция весьма проста и надежна по сравнению с паровыми котлами. Кроме того, отсутствие уходящих в атмосферу дымовых газов приближает коэффициент полезного действия (КПД) таких аппаратов к 100%. Основным недостатком теплогенераторов с мгновенной подачей – это получение парогазовой смеси (смесь водяного пара, воздуха и продуктов сгорания) вместо водяного пара, что значительно сужает область их применения.

Даже при идеальных условиях сжигания газового топлива (то есть при стехиометрическом сжигании), в состав получаемой парогазовой смеси (ПГС) входит углекислый газ, который под воздействием ряда факторов, в том числе высокой температуры, образует неустойчивую углекислоту. Другим вредным компонентом парогазовых смесей являются оксиды азота, которые образуются в результате окисления азота во фронте факела [8] и наличия азотсодержащих соединений в жидком

Никитин М. Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси // [Промышленная энергетика](http://science.nikitin-pro.ru/j/Nikitin-IE-2010.pdf). 2010. № 6. С. 42--46. URL: <http://science.nikitin-pro.ru/j/Nikitin-IE-2010.pdf>

---

топливе. Таким образом, люди и животные не должны находиться в непосредственном контакте с парогазовыми смесями.

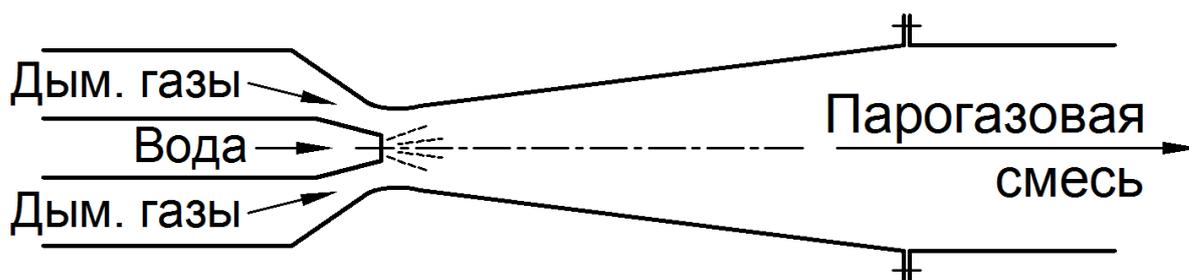
Тем не менее, парогазовые смеси находят широкое применение во многих сферах деятельности, благодаря простоте конструкции генераторов ПГС, низкой стоимости этого теплоносителя, а также простоте регулирования и широкому диапазону содержания водяных паров и температуры. В сельском хозяйстве такие многокомпонентные теплоносители используются для дезинфекции пашен, хлебов, фуража и переработки сельскохозяйственного сырья. В строительстве для затворения бетона на мобильных бетонных заводах и снятия наледи с металлических конструкций на строительных площадках. В горной промышленности парогазовые смеси используются для предварительной обработки ископаемых материалов. В военном деле многокомпонентные теплоносители могут быть использованы для эффективной дезинфекции техники, обмундирования и укрытий. Все вышеперечисленные категории потребителей, как правило, не имеют доступа к источникам централизованного теплоснабжения и вынуждены самостоятельно организовывать выработку и транспортировку тепла.

Механизм получения парогазовой смеси в существующих генераторах ПГС с мгновенной подачей основан на впрыске воды в поток дымовых газов (например, парогенераторы Амелина [5], работающие по технологии STEAM-ENG, теплогенераторы Johnson CurePak [6] и другие конструкции [3, 4]) или направлении потока дымовых газов на поверхность воды (так называемые погружные горелки, например, теплогенераторы Welden [7]).

В существующей технологии впрыска воды (как правило, радиальное распыление рядом форсунок) используется эффект скачка давления в проточном тракте продуктов сгорания за счет вскипания впрыскиваемой воды. Подобный эффект возникает при подпитке котла в случае упуска воды из барабана. Однако вскипание в динамическом потоке сводит к минимуму прирост статического давления и в результате фактическое давление ПГС на выходе из указанных выше теплогенераторов едва ли превышает атмосферное. Существующая технология впрыска воды не позволяет использовать кинетическую энергию водяного потока и более того, в некоторой степени, такой впрыск является дополнительным аэродинамическим сопротивлением потоку дымовых газов.

Если использовать кинетическую энергию потока воды в теплогенераторе так, как она используется в струйных водоподогревателях [9, 10], то возможно повышение давления получаемой парогазовой смеси. Давление продуктов сгорания после дутьевой горелки, как правило, не превышает 20 кПа и его увеличение ведет к значительному усложнению конструкции горелочного устройства. Между тем, давление впрыскиваемой воды в 300 кПа (~ 3 ат) легко достижимо. Например, при избыточном давлении воды в сопле (см. рис. 1) равном 3 ат, расходе воды 30 г/с и диаметре выходного отверстия 1.25 мм можно получить струю воды со скоростью 25 м/с. Видно, что даже при малом расходе воды можно достичь достаточно большой скорости водяного потока, а значит и импульса, который будет увлекать за собой дымовые газы. Максимальный расход воды определяется тепловой мощностью горелки, так как необходимо испарение всей массы впрыскиваемой воды. То есть чем мощнее горелка, тем больше тем паропроизводительность парогенератора. В указанном примере, где расход воды составлял 30 г/с, в расчет принималась газовая дутьевая горелка с тепловой мощностью 120 кВт и расходом газа 12 м<sup>3</sup>/ч.

Снижение расхода воды при неизменной тепловой мощности горелки приведет к перегреву получаемой парогазовой смеси. Аналогично, чем меньше расход воды его максимального значения, тем больше степень перегрева смеси. Таким образом, процесс регулирования температуры парогазовой смеси оказывается весьма простым и осуществляется практически без инерции.



На рис. 1 представлена принципиальная схема генератора ПГС с направленным впрыском воды.

Рассмотрим конструкцию генератора ПГС без перегрева впрыскиваемой воды. Горячие дымовые газы формируются в топке (при использовании генератора ПГС в качестве утилизатора теплоты уходящих газов от какой-либо огнетехнической установки) или непосредственно в камере сгорания теплогенератора (при автономной работе), которая показана в левой части на рис. 1. В камере сгорания, по оси газового тракта устанавливается водяное сопло. Установка водяного сопла по оси парогенератора

позволяет максимально использовать энергию водяного потока. Для повышения статического давления дымовых газов с одной стороны и исключения блокирования канала вследствие бурного парообразования с другой, впрыск производится именно в горловине камеры смешения теплогенератора, выполненной в виде трубы Вентури. Таким образом, зона парообразования приходится на дивергентную часть трубы Вентури. Разгон дымовых газов в конвергентной части трубы Вентури, приводит к снижению давления в зоне выходного сечения водяного сопла. При достаточном давлении и расходе воды возможно даже создание разрежения в этой области. В этом случае дымовые газы инжектируются рабочим потоком воды. Затраты тепловой энергии в зоне парообразования компенсируются потоком дымовых газов. Для снятия тепловых нагрузок со стенок генератора ПГС и подогрева перед подачей в водяное сопло воды используется охлаждающий корпус (здесь не показан). Охлаждающий корпус представляет собой кожух, покрывающий теплогенератор по всей длине. Причем образованный между корпусом и кожухом зазор заполняется водой.

Конструктивное отличие генератора ПГС с перегревом впрыскиваемой воды от описанной выше конструкции (без перегрева) заключается в увеличении поверхности теплообмена продуктов сгорания и ПГС с впрыскиваемой водой и его интенсификации. Эти особенности позволяют добиться перегрева впрыскиваемой воды в водяном сопле, что обеспечит ее мгновенное вскипание при попадании в камеру смешения. Увеличение поверхности теплообмена достигается изменением способа подачи воды в водяное сопло, который заключается в использовании нескольких водяных каналов (здесь не показаны) малого диаметра вместо одного канала большого диаметра. Водяные каналы имеют в поперечном сечении эллипс с меньшим диаметром, перпендикулярным потоку дымовых газов, что значительно снижает аэродинамическое сопротивление водяных каналов дозвуковому потоку [2] продуктов сгорания и увеличивает конвективную составляющую теплопередачи в водяных каналах. Интенсификация теплообмена достигается использованием спирального канала, образованного тонкой стальной лентой, приваренной к внешней поверхности стенки камеры сгорания по спирали, причем ширина ленты равна толщине водяного корпуса этой камеры. Таким образом, холодная вода, попадая в водяной корпус, в области камеры сгорания движется по спиральному каналу, что исключает возникновение зон с пониженной циркуляцией. Кроме того, скорость течения по каналу будет значительно выше скорости в полом корпусе из-за разности проходных сечений.

Проведенные расчеты показывают, что модель парогенератора с направленным впрыском пара (Рис. 1) работоспособна, а развитие теплообмена дымовых газов с питательной водой позволяет перегревать воду.

Для определения теплового потока от дымовых газов к питательной воде были составлены следующие энергетические балансы:

$$\begin{cases} Q = G_v \cdot c_v \cdot (T_{v1} - T_{v0}) \\ Q = k \cdot F \cdot \Delta T \\ Q = G_{дг} \cdot c_{дг} \cdot (T_{дг0} - T_{дг1}) \end{cases},$$

где  $G_v$  – массовый расход воды, кг/с;  $c_v$  – средняя теплоемкость воды, кДж/(кг·°C);  $T_{v0}$  и  $T_{v1}$  – начальная и конечная температуры воды, °C;  $k$  – коэффициент теплопередачи через стенку, кВт/(м·°C);  $F$  – площадь

поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta T = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)}$  – логарифмический температурный напор, °C;  $G_{дг}$

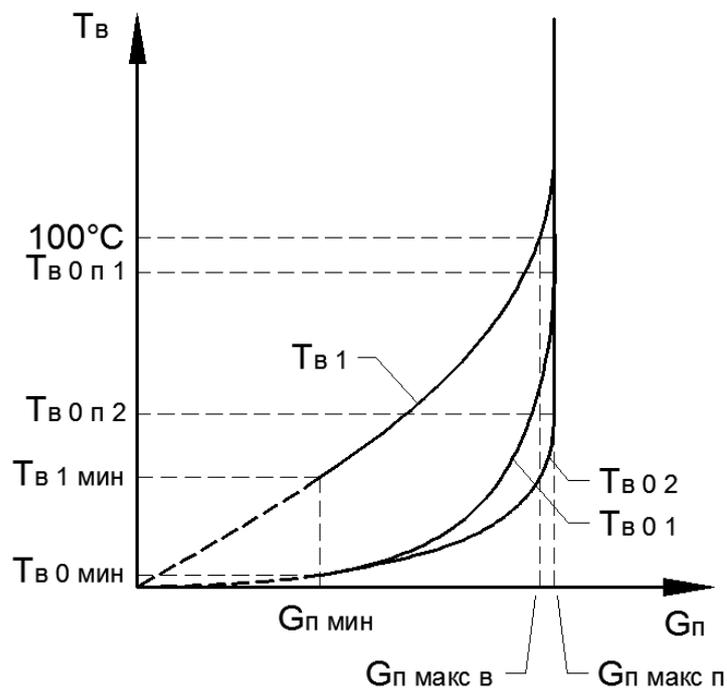
– объемный расход дымовых газов, м<sup>3</sup>/с;  $c_{дг}$  – средняя теплоемкость дымовых газов, кДж/(м<sup>3</sup>·°C);  $T_{дг0}$  и  $T_{дг1}$  – начальная (факела) и конечная (перед смешением с водой (паром)) температуры дымовых газов, °C.

Паропроизводительность была условно определена как сумма расходов дымовых газов и питательной воды:

$$G_n = G_{дг} + \frac{G_v}{\rho_v},$$

где  $\rho_v$  – средняя плотность питательной воды, кг/м<sup>3</sup>.

Максимальная паропроизводительность  $G_{п\ макс}$  при прочих равных условиях определяется максимальным расходом воды  $G_{в\ макс}$ , при котором вся впрыскиваемая вода испаряется. Решение указанной системы энергетических балансов позволило получить зависимость паропроизводительности теплогенераторов обеих конструкций от температур питательной воды.



По приведенной зависимости (Рис. 2) видно, что максимальная производительность теплогенераторов с направленным впрыском воды  $G_{п\ макс\ в}$  наблюдается при нагреве питательной воды в кожухах до  $100^{\circ}\text{C}$ . Перегрев воды несколько увеличивает паропроизводительность (т.е. при направленном впрыске пара), но также до определенного значения  $G_{п\ макс\ п}$ . Кроме того, очевидно наличие минимальных температур питательной воды  $T_{в\ 0\ мин}$  и  $T_{в\ 1\ мин}$ , при которых наблюдается минимальная паропроизводительность  $G_{п\ мин}$ . При подаче воды с температурой ниже минимальной, поток воды испарится не полностью и будет накапливаться в паропроводе.

Были проведены параллельные расчеты систем балансов для обеих конструкций теплогенераторов (без перегрева воды и с перегревом). Для наглядности, на диаграмме (рис. 2) начальные температуры подаваемой воды  $T_{в\ 0\ 1}$  (для конструкции без перегрева воды) и  $T_{в\ 0\ 2}$  (для конструкции с перегревом воды)

были приведены к единой конечной температуре  $T_{в1}$ . Видно, что для достижения одной и той же конечной температуры воды, начальная температура воды, подаваемой в парогенератор первой конструкции (без перегрева)  $T_{в01}$  должна быть выше, чем начальная температура воды для парогенератора второй конструкции (с перегревом)  $T_{в02}$ . Особенно это заметно при условии достижения максимальной паропроизводительности установки. Начальные температуры питательной воды, необходимые для достижения максимума паропроизводительности заметно отличаются и составляют  $T_{в0п1}$  и  $T_{в0п2}$  для первой (без перегрева) и второй (с перегревом) конструкций соответственно. Отсюда очевидно преимущество второй конструкции, требующей меньшего нагрева подаваемой воды для достижения режима впрыска перегретой воды.

Если не учитывать давление дымовых газов в зоне выхода струи воды (пара) из водяного сопла, то зависимость расхода питательной воды  $G_v$  от давления  $P_v$  при площади выходного сечения сопла  $F_0$ :

$$G_v = \mu \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_v}{\rho_{в1}}},$$

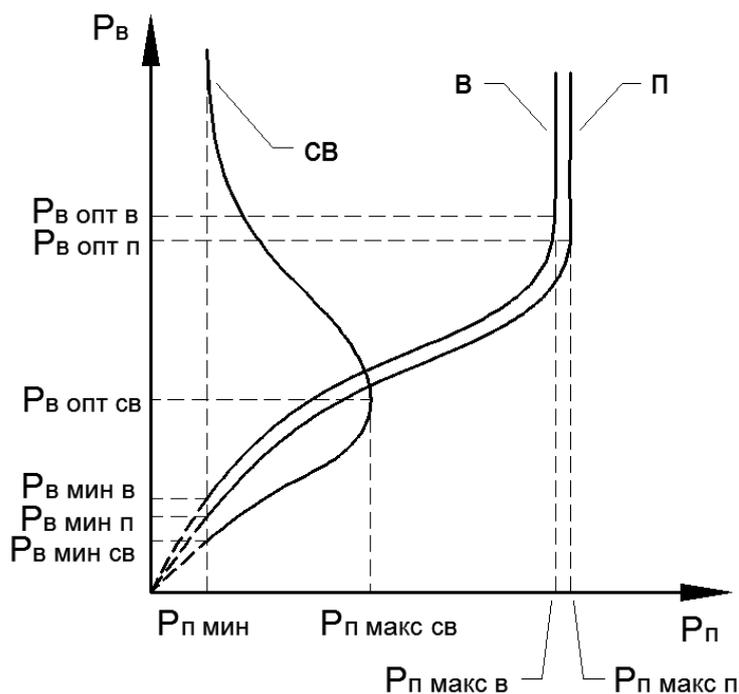
где  $\mu = \epsilon \cdot \phi$  – коэффициент расхода;  $P_v$  – давление питательной воды в сопле, Па;  $\rho_{в1}$  – плотность воды при температуре  $T_{в1}$ , кг/м<sup>3</sup>.

Давление смешанного потока (т.е. парогазовой смеси)  $P_n$  можно определить по следующей зависимости [1]:

$$\frac{\Delta P_n}{P_{дг}} = \frac{k_v}{2 \cdot (k_v + 1) \cdot \frac{P_{дг}}{P_v}} \cdot \frac{\phi_1^2 \cdot \phi_2^2 \cdot \lambda_{в-дг}^2}{\left(\frac{1}{\phi_3} + 0.5\right) \cdot \frac{W_n}{W_v} \cdot (1+u)^2 - (\phi_2 \cdot \phi_4 - 0.5) \cdot \frac{W_{дг}}{W_v} \cdot n \cdot u^2},$$

где  $P_{дг}$  – давление дымовых газов, Па;  $k_v$  – показатель адиабаты воды;  $\phi$  – коэффициент скорости для каждого сечения;  $W_n$ ,  $W_v$  и  $W_{дг}$  – скорости потоков парогазовой смеси, воды и дымовых газов, м/с;  $u$  – коэффициент инжекции;  $n = F_3/F_{дг}$  – коэффициент, учитывающий площади сечений камер смешения и сгорания.

Аэродинамический расчет теплогенераторов [2] со свободным и направленным впрыском позволяет составить сравнительную характеристику по важному параметру – давлению получаемой парогазовой смеси. Графическое отображение полученной сравнительной характеристики парогенераторов представлено на рис. 3.



Видно, что повышение давления питательной воды в парогенераторах со свободным впрыском до оптимального значения  $P_{v \text{ опт св}}$  приводит к росту давления парогазовой смеси до значения  $P_{пгс \text{ макс св}}$ . Однако дальнейший рост давления воды приводит к увеличению аэродинамического сопротивления потоку дымовых газов и, следовательно, снижению давления парогазовой смеси. Увеличение давления питательной воды в парогенераторах с направленным впрыском выше оптимальных значений  $P_{v \text{ опт в}}$  и  $P_{v \text{ опт п}}$  существенно не влияет на давления парогазовой смеси, которые будут равны  $P_{пгс \text{ макс в}}$  и  $P_{пгс \text{ макс п}}$  соответственно.

Также очевидна разница максимальных давлений парогазовой смеси при направленном впрыске воды  $P_{пгс \text{ макс в}}$  и пара  $P_{пгс \text{ макс п}}$ . Таким образом, перегрев питательной воды до впрыска в поток продуктов сгорания оказывает положительное влияние на рабочие характеристики теплогенератора. С другой

Никитин М. Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси // [Промышленная энергетика](http://science.nikitin-pro.ru/j/Nikitin-IE-2010.pdf). 2010. № 6. С. 42--46. URL: <http://science.nikitin-pro.ru/j/Nikitin-IE-2010.pdf>

---

стороны, указанная разница оказывается не большой, что свидетельствует о конкурентоспособности парогенераторов с направленным впрыском воды в виду простоты их исполнения. Также это подтверждает надежность работы парогенераторов с направленным впрыском пара, так как при снижении теплообмена с питательной водой или давления подачи топлива они работают в режиме впрыска воды, что очевидно не приведет к значительному снижению заявленных параметров парогазовой смеси.

На рис. 3 также заметно наличие минимальных давлений питательной воды  $P_{в\ мин}$ , при которых наблюдается минимальное давление парогазовой смеси  $P_{п\ мин}$ . Равенство минимальных давлений парогазовой смеси для всех рассматриваемых типов парогенераторов объясняется отсутствием принципиальных отличий между ними в этом режиме. При давлении воды ниже минимального, она будет поступать в камеру смешения в недостаточном для существенного парообразования количестве и с недостаточным для образования струи со значительным импульсом.

Изложенные выше результаты сравнительного анализа смесительных генераторов ПГС свидетельствуют о целесообразности дальнейшего исследования предложенных в этой статье моделей.

#### **Использованные источники:**

1. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
2. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. – М.: Наука, 1990. – 368 с.

Никитин М. Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси // [Промышленная энергетика](#). 2010. № 6. С. 42--46. URL: <http://science.nikitin-pro.ru/j/Nikitin-IE-2010.pdf>

---

3. Патент ВОИС № 005797 A1, F22B 1/26 Парогенератор с мгновенным режимом подачи/ N.E. Feilden (Великобритания) Заяв. 05.07.02. Опубл. 15.01.04.
4. Патент США № 7146937 B2, F22G 5/12 Конструкция камеры сгорания для парогенератора с впрыском воды и охлаждением/ T.J. Kraus (США) Заяв. 18.04.05. Опубл. 12.12.06.
5. Группа компаний “Амелин” [электронный ресурс]: официальный сайт производителя. – Режим доступа: <http://amelin.ru>, свободный.
6. Johnson Gas Appliance Co. [электронный ресурс]: официальный сайт производителя. – Режим доступа: <http://www.johnsongas.com/industrial/concrete.asp>, свободный.
7. Welden Steam Generators, Inc. [электронный ресурс]: официальный сайт производителя. – Режим доступа: <http://www.weldensteam.com/steam3.htm>, свободный.
8. Fenimore С.Р. Формирование оксидов азота в углеводородных пламенах / Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames: 13th Int Symp. On Combustion. Pittsburg, 1971. – с. 373-380.
9. Фисенко В.В. Новое в термодинамике двухфазных потоков. Теоретические предпосылки и практические решения [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fisonic.com/term.htm>, свободный.
10. Белевич А.И., Жуков С.И., Крупцев А.В. Сверхзвуковой струйно-форсуночный аппарат (СФА) [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://проема.ru/texts/5>, свободный.

Рис. 1. Теплогенератор с направленным впрыском воды

Рис. 2. Зависимость производительности теплогенераторов от начальной и конечной температур подаваемой воды

Рис. 3. Сравнительная характеристика теплогенераторов по давлению получаемой парогазовой смеси: св – свободный впрыск воды; в – направленный впрыск воды; п – направленный впрыск пара.