

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ ЭЖЕКЦИОННЫХ ГОРЕЛОК С ЗАВЕСОЙ

### АННОТАЦИЯ

В работе описаны результаты экспериментальных исследований двухступенчатых эжекционных горелок для сжигания природного газа низкого давления. Для верификации теоретической модели эжекции эксперименты проводились на модельных эжекторных горелках, в которых в качестве эжектирующего газа использовался воздух низкого давления.

Натурные испытания горелок проводились в составе отопительного котла ГУТ-100М. Результаты натурных испытаний дали хорошее согласование с теоретической моделью.

В работе приведены экспериментальные и расчетные значения, определяющие чистоту сжигания природного газа.

При проведении исследований и разработке котла все основные работы проводились с эжекционной системой подачи, выполненной в виде одноступенчатых эжекторов. Вместе с тем, испытания такой эжекционной системы подачи в составе котла показали возможность проскока пламени, вызываемого либо высоким уровнем пульсаций в камере сгорания котла, либо при переключениях горелок котла при автоматическом его регулировании. Эти явления относительно редкие, наблюдаются в основном при пониженных давлениях подачи газа, но плохо то, что при проскоке пламени внутрь эжекционной горелки горение стабилизируется у отверстий подачи газа и не устраняется при снятии возмущения в камере сгорания.

Экспериментальное исследование характеристик двухступенчатой эжекционной горелки с завесой на выходе проводилось на той же установке, что и в случае характеристик одноступенчатой эжекционной горелки. Схема установки представлена на рис. 1. Воздух из баллонной батареи через редуктор подавался в балластный бачок для сглаживания пульсаций давления после редуктора и затем проходил через счетчик измерения объемного расхода

газа АС-250. Далее воздух подавался в форсуночную головку эжектора. На выходе камера смешения эжектора соединялась с камерой разрежения, в которой с помощью вспомогательного эжектора, расположенного на выходе установки, можно было создавать разрежение. Между камерой разрежения и вспомогательным эжектором размещалось сопло Вентури для измерения общего расхода газа, проходящего через исследуемый эжектор. В сопле эжектируемого газа эжектора на выходе сопла по его оси устанавливался насадок статического давления диаметром 2 мм для измерения давления в выходном сечении сопла.

Испытание двухступенчатой эжекционной горелки с завесой на выходе проводилось или в полной схеме, т.е. определялся полный расход эжектируемого воздуха с учетом завесы, или при исключении завесы на выходе, для чего последняя перекрывалась с помощью изоляции.

Проводилось измерение давления подачи газа (воздуха) перед форсуночной головкой, расход газа (воздуха) через форсуночную головку (эжектирующий газ), общий расход газа через исследуемый эжектор, давление в насадке статического давления на выходе сопла эжектируемого воздуха первой ступени эжектора и давление в камере разрежения.

Показания насадка статического давления, установленного в выходном сечении сопла эжектируемого воздуха, использовались для расчета расхода эжектируемого воздуха в первой ступени эжектора.

Расход эжектируемого воздуха в первой ступени эжектора рассчитывался по стандартной формуле  $G = K_G F \sqrt{2\rho\Delta P}$ , где  $G$  – массовый расход,  $K_G$  – коэффициент расхода сопла, зависящий от числа Рейнольдса сопла,  $F$  – площадь горла сопла,  $\rho$  – плотность воздуха, рассчитанная с использованием измеренного барометрического давления и температуры в помещении стенда,  $\Delta p$  – перепад давления в сопле, измеряемый статическим насадком.

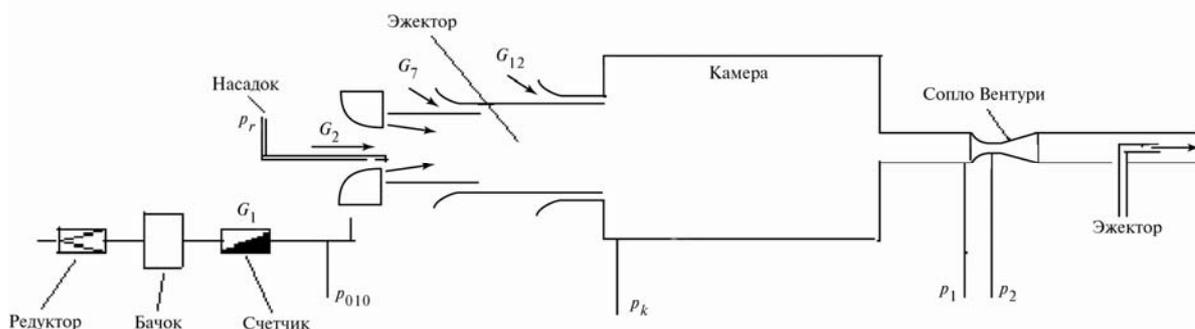


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

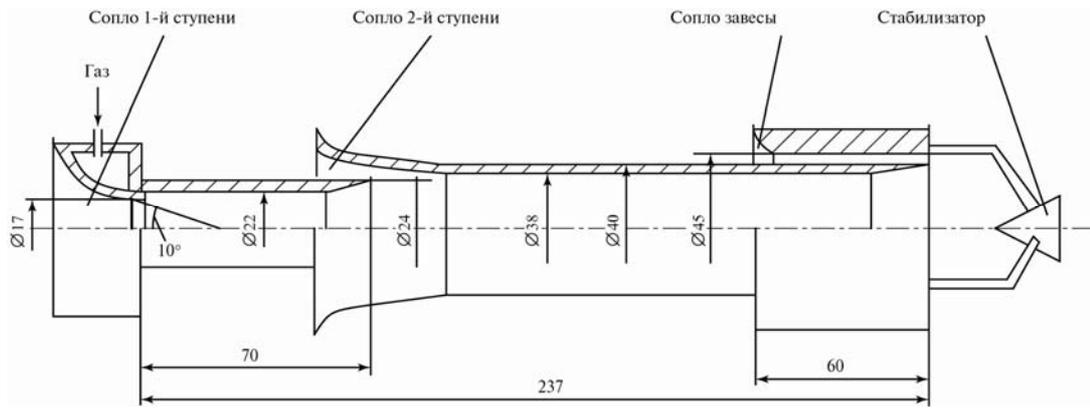


Рис. 2. Схема эжекционной горелки котла ГУТ-100М

Были испытаны двухступенчатые эжекционные горелки с завесой на выходе для котлов ГУТ-25 и ГУТ-100М. В котлах ГУТ-25 (с теплопроизводительностью 25 кВт) и ГУТ-100М (с теплопроизводительностью 100 кВт) устанавливаются по восемь горелок с тепловой мощностью 3,2 кВт и 12,5 кВт соответственно. Детальные испытания проводились с заменой газа на воздух. Экспериментальное исследование моделей эжектора проводилось при давлении подачи газа (воздуха), близкого к  $p_{010} = 2000$  Па.

На рис. 2 представлена схема двухступенчатой эжекционной горелки с завесой на выходе для котла ГУТ-100М. Форсуночная головка содержала центральное сопло подачи воздуха диаметром 17 мм на выходе, в обечайке по периферии сопла были выполнены три отверстия диаметром 1,7 мм подачи газа, наклоненные под углом  $10^\circ$  к оси горелки. Камера смешения первой ступени была выполнена с цилиндрическим участком диаметром 22 мм, на выходе которого выполнялся диффузорный участок с диаметром выхода 24 мм. Кольцевое сопло второй ступени на выходе имело внутренний диаметр

24 мм и наружный диаметр 44 мм. Камера смешения второй ступени имела сходящийся конфузорный участок, цилиндрический участок диаметром 38 мм, на выходе которого выполнялся диффузорный участок с диаметром выхода 40 мм. Кольцевое сопло завесы на выходе имело внутренний диаметр 40 мм и наружный диаметр 45 мм.

На рис. 3 представлены результаты испытаний на воздухе двухступенчатой эжекционной горелки с завесой на выходе для котла ГУТ-100М. Испытания проведены с использованием насадка статического давления диаметром 2 мм, что позволило определить коэффициент эжекции первой ступени эжекционной горелки. На рис. 3 представлены также результаты расчета коэффициентов эжекции по предложенной теории [1–3].

Результаты представлены в виде зависимостей коэффициентов эжекции  $n = G/G_1$ , где  $G$  – расход эжектируемого воздуха,  $G_1$  – расход эжектирующего газа (в нашем случае – воздуха) для первой ступени (теория – кривая 1, эксперимент – квадратики), первой и второй ступеней эжектора (теория – кривая 2, эксперимент – треугольники) и в целом двух-

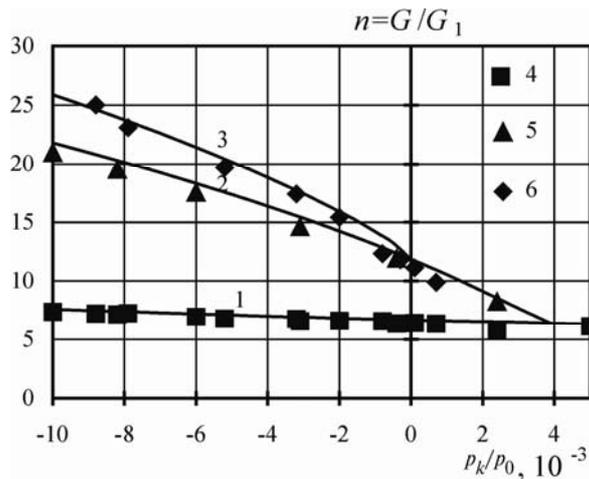


Рис. 3. Зависимости коэффициента эжекции  $n = G/G_1$  от относительного разрежения  $\bar{p}_k = p_k/p_0$ : 1 – расчетная кривая эжектора первой ступени горелки; 2 – расчетная кривая эжектора второй ступени горелки; 3 – расчетная кривая в целом двухступенчатой эжекционной горелки с завесой на выходе; 4 – эксперимент для первой ступени горелки; 5 – эксперимент для второй ступени горелки; 6 – эксперимент для горелки в целом

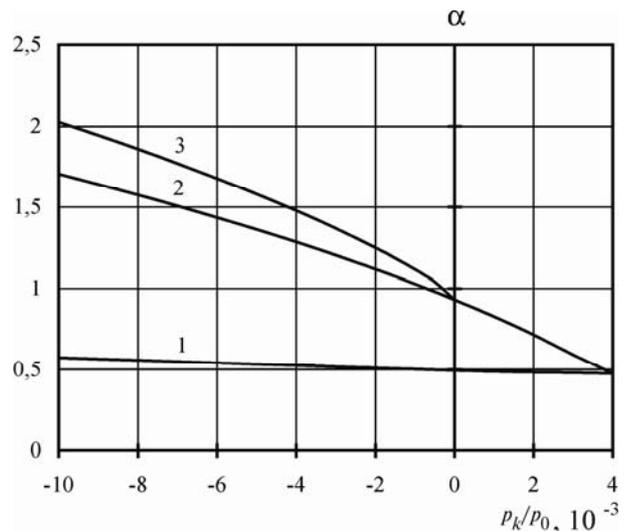


Рис. 4. Зависимости коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от относительного разрежения  $\bar{p}_k = p_k/p_0$ : 1 – первая ступень горелки; 2 – вторая ступень горелки; 3 – горелка в целом

ступенчатой эжекционной горелки с завесой на выходе (теория – кривая 3, эксперимент – ромбики) от относительного давления (разрежения)  $p_k = p_k/p_0$  в камере разрежения (см. рис. 2). Из рис. 3 видно удовлетворительное согласие теории и эксперимента для всех рассмотренных случаев.

Были выполнены расчеты коэффициента избытка воздуха при использовании в качестве горючего газа природного газа (метана) в двухступенчатой эжекционной горелке с завесой на выходе для котла ГУТ-100М. Расчеты выполнены с использованием теоретических результатов для случая испытаний на воздухе горелки котла. При проведении расчетов проводился пересчет на реальный эжектирующий газ (метан). На рис. 4 представлены зависимости коэффициентов избытка воздуха  $\alpha$  первой ступени (кривая 1), первой и второй ступеней эжектора (кривая 2) и в целом двухступенчатой эжекционной горелки с завесой на выходе (кривая 3) от относительного давления (разрежения)  $\overline{p_k} = p_k/p_0$  в камере разрежения.

Из рис. 4 видно, что в первой ступени коэффициент избытка воздуха  $\alpha < 0,6$  во всем рассмотренном диапазоне, т.е. метановоздушная смесь не может гореть. При реальных условиях работы котла у дна камеры сгорания в зависимости от условий работы котла (давление подачи газа, разрежение за котлом) реализуется  $\overline{p_k} = p_k/p_0 = -1 \cdot 10^{-3} \div -2 \cdot 10^{-3}$ . Для этих условий коэффициент избытка воздуха на выходе второй ступени горелки составит  $\alpha = 1,03 \div 1,12$  и на выходе горелки в целом (с учетом завесы)  $\alpha = 1,12 \div 1,25$ , т.е. условия для горения выполняются. Для обеспечения устойчивого горения при высоких скоростях метановоздушной смеси (до 4 м/с) на выходе горелки устанавливается конический стабилизатор (см. рис. 2).

На рис. 5 представлены результаты измерений (квадратные значки) и расчета (кривая) КПД котла ГУТ-100М. Значения КПД представлены в зависимости от температуры воды на входе в котел. Отметим удовлетворительное согласие теории [4] и эксперимента. Из рис. 5 видно, что рост КПД котла ГУТ-100М начинается при температуре воды на

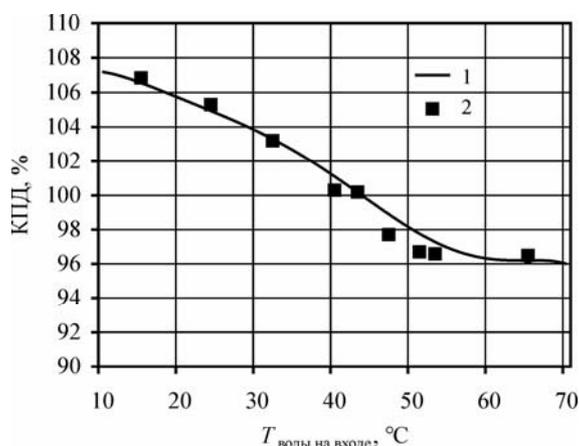


Рис. 5. Значение КПД котла от температуры теплоносителя на входе в котел  $T_{\text{воды на входе}}$ : 1 – расчет; 2 – эксперимент

входе в котел менее  $50^\circ\text{C}$  (область конденсации паров воды).

На рис. 6 представлены результаты измерений (квадратные значки) и расчета (кривая) массового расхода конденсата  $G_{\text{конд}}$ , отнесенные к массовому расходу природного газа  $G_{\text{газ}}$ , в зависимости от температуры воды на входе в котел. Отметим удовлетворительное согласие теории и эксперимента. Из рис. 6 видно, что конденсация паров воды начинается при температуре воды на входе в котел менее  $48^\circ\text{C}$ .

Как это видно из рис. 5 и рис. 6, максимальные КПД и относительный расход конденсата паров воды достигаются при наименьшей температуре воды на входе в котел, равной  $15^\circ\text{C}$ , и составляют КПД = 106,82% и  $G_{\text{конд}}/G_{\text{газ}} = 1,858$ . КПД определяется согласно ГОСТ 20548-87 по низшей теплоте сгорания природного газа. При таком способе определения максимально возможный КПД в случае природного газа составит 111%. Максимально возможный (при полном выделении конденсата) в случае природного газа относительный расход конденсата паров воды равен  $G_{\text{конд}}/G_{\text{газ}} = 2,2$ . При отсутствии конденсации паров воды из уходящих газов (при температуре воды на входе в котел более  $50^\circ\text{C}$ ) КПД котла равен 96%.

**Примечание:** «Тепловым эффектом, или теплотой сгорания  $Q$  называют количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кмольа, 1 кг или  $1 \text{ м}^3$  газа при нормальных физических условиях. Различают высшую  $Q_v$  и низшую  $Q_n$  теплоту сгорания. Высшая теплота сгорания включает в себя теплоту, выделяющуюся при конденсации водяных паров в процессе горения. Практически при сжигании газа водяные пары, как правило, не конденсируются, а удаляются вместе с другими продуктами сгорания. Поэтому технические расчеты обычно ведут по низшей теплоте сгорания, т.е. без учета теплоты конденсации водяных паров, составляющей около 2400 кДж/кг».

**Экология котла ГУТ-100М.** Содержание оксида углерода CO в сухих уходящих газах в пересчете на  $\alpha = 1$   $C_{\alpha=1}^{\text{CO}} = 26 \div 29 \text{ мг/м}^3$ , содержание оксидов

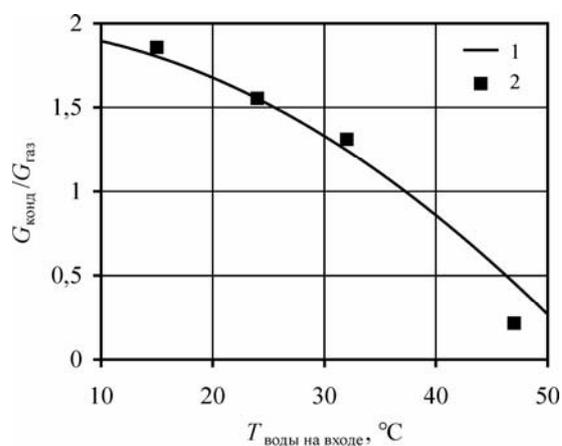


Рис. 6. Зависимость относительного расхода конденсата от температуры теплоносителя на входе в котел  $T_{\text{воды на входе}}$ : 1 – расчет; 2 – эксперимент

азота  $\text{NO}_x$  (в пересчете на двуокись азота  $\text{NO}_2$ ) в сухих уходящих газах в пересчете на  $\alpha = 1$   $C_{\alpha=1}^{\text{NO}_x} = 96 \div 107 \text{ мг/м}^3$  (ГОСТ 20548-87  $C_{\alpha=1}^{\text{CO}}$  – не более  $119 \text{ мг/м}^3$ ,  $C_{\alpha=1}^{\text{NO}_x}$  – не более  $240 \text{ мг/м}^3$ ). Таким образом, содержание оксида углерода  $\text{CO}$  в сухих уходящих газах в пересчете на  $\alpha = 1$  и содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  (в пересчете на двуокись азота  $\text{NO}_2$ ) в сухих уходящих газах в пересчете на  $\alpha = 1$  соответствует ГОСТ 20548-87.

В пересчете на международную норму для котла ГУТ-100М: содержание  $\text{CO}$  в уходящих газах –  $22\text{--}25 \text{ мг/(кВт}\cdot\text{ч)}$ , содержание  $\text{NO}_x$  в уходящих газах –  $84\text{--}91 \text{ мг/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . Соответствующие нормы RAL-UZ 39 (Знак «Голубой ангел»):  $\text{CO}$  – не более  $60 \text{ мг/(кВт}\cdot\text{ч)}$ ,  $\text{NO}_x$  – не более  $100 \text{ мг/(кВт}\cdot\text{ч)}$ . Таким образом, содержание оксида углерода  $\text{CO}$  и содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  (в пересчете на двуокись азота  $\text{NO}_2$ ) соответствует RAL-UZ 39 (Знак «Голубой ангел»).

Уровень звука при номинальной теплопроизводительности –  $67\text{--}70 \text{ дБА}$  (ГОСТ 20548-87 – не более  $80 \text{ дБА}$ ), т.е. соответствует ГОСТ 20548-87.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$C_{\alpha=1}^{\text{CO}}$  – содержание оксида углерода в сухих уходящих газах в пересчете на  $\alpha = 1$ ,  $\text{мг/м}^3$ ;

$C_{\alpha=1}^{\text{NO}_x}$  – содержание оксидов азота в сухих уходящих газах в пересчете на  $\alpha = 1$  и на двуокись азота,  $\text{мг/м}^3$ ;

$F$  – площадь горла сопла,  $\text{м}^2$ ;

$G$  – массовый расход эжектируемого воздуха,  $\text{кг/с}$ ;

$G_{\text{газ}}$  – массовый расход природного газа, подаваемого в котел,  $\text{кг/с}$ ;

$G_{\text{конд}}$  – массовый расход сконденсированных из уходящих газов паров воды,  $\text{кг/с}$ ;

$G_1$  – расход эжектирующего газа,  $\text{кг/с}$ ;

$K_G$  – коэффициент расхода сопла;

$n$  – коэффициент эжекции;

$p_k$  – давление разряжения в камере, Па;

$\overline{p_k}$  – относительное разряжение в камере, Па;

$p_0$  – полное давление эжектируемого воздуха, Па;

$p_{010}$  – полное давление эжектирующего газа, Па;

$\Delta p$  – перепад давления в сопле, измеряемый статическим насадком, Па;

$Q_v$  – высшая теплота сгорания,  $\text{МДж/кг}$ ;

$Q_n$  – низшая теплота сгорания,  $\text{МДж/кг}$ ;

$T_{\text{воды на входе}}$  – температура теплоносителя на входе в котел,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;

$\rho$  – плотность воздуха, рассчитанная с использованием измеренного барометрического давления и температуры в помещении стенда,  $\text{кг/м}^3$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евсеев Г.А.** Исследование одноступенчатых эжекционных горелок (часть 1) // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. №2.
2. **Евсеев Г.А.** Исследование одноступенчатых эжекционных горелок (часть 2) // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. №3.
3. **Евсеев Г.А. Благов В.В.** Исследование двухступенчатых эжекционных горелок с завесой // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. №4.
4. **Евсеев Г.А.** Анализ характеристик высокоэкономичных котлов ГУТ-100 и ГУТ-100М для децентрализованных систем теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. 2003. №1.