

УДК 73.31.41

**РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОМ КАНАЛЕ ГОРЕЛОЧНОГО
УСТРОЙСТВА**

Арпабекова Айман Муратбековна

aimana-sholpana88@mail.ru

Преподаватель Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева,

г. Нур- Султан, Казахстан

Научный руководитель -М.И.Арпабеков

Приступим к анализу теплофизических процессов, протекающих в камере горелочного устройства. Для этого запишем уравнения, отражающие, в сущности, основные законы сохранения в канале, где происходит тепловыделение за счет химической реакции горения. При этом сформулируем необходимые уравнения в наиболее общем виде. По необходимости их можно конкретизировать на различные случаи горения, которые определяются техническими деталями горелочного устройства и практической пригодностью точности теоретических выводов в рамках принятой модели. Для этого примем следующие допущения:

поток газа (или газокапельной среды), движущийся по каналу можно характеризовать средними по сечению значениями плотности, давления, скорости и температуры;

гидродинамическое сопротивление в канале можно приближенно описать как полное сопротивление на стенках, отнесенное ко всему объему выделенного участка канала;

скорость тепловыделения за счет протекания химических реакций горения в наиболее простом виде можно характеризовать одной функцией;

закрутку потока в канале, осуществляемую за счет внешнего источника, можно представить в виде дополнительного источника турбулентности в виде механического устройства с лопатками и совершающим техническую работу;

горелочное устройство находится в однородном поле силы тяжести.

Получение решения методом последовательных приближений

Запишем систему уравнений из первого раздела, выражающих собой законы сохранения энергии, массы и импульса, где пренебрегается силами гидродинамического сопротивления, объемными силами и потенциальной энергией газа:

$$q + w^t = h_2 - h_1 + \frac{v_{c2}^2 - v_{c1}^2}{2}, \quad (1.1)$$

$$m' = \rho_1 v_{c1} A_1 = \rho_2 v_{c2} A_2 = \text{const}, \quad (1.2)$$

$$m' \left(\frac{v_{c2}}{A_2} - \frac{v_{c1}}{A_1} \right) = p_1 - p_2. \quad (1.3)$$

Из (1.2) выразим скорость на выходе из канала:

$$v_{c2} = \frac{\rho_1 A_1}{\rho_2 A_2} v_{c1}$$

Далее, заменим в полученной формуле отношение плотностей на выражение:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1 T_2}{T_1 p_2}$$

которое следует из уравнения состояния $p = \rho R_g T$, (R_g – газовая постоянная) записанного для входного и выходного сечений канала. Тогда получим:

$$v_{c2} = \frac{p_1 T_2 A_1}{T_1 p_2 A_2} v_{c1} \quad (1.4)$$

В уравнении энергии (1.1) используем известное выражение для энтальпии $h = c_p T$ [1, 2], где c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении. С учетом формулы (1.4) уравнения (1.1) и (1.3) можно записать как

$$q + w^t = c_p (T_2 - T_1) + \frac{v_{c1}^2}{2} \left[\left(\frac{p_1 T_2 A_1}{T_1 p_2 A_2} \right)^2 - 1 \right] \quad (1.5)$$

$$m' \left(\frac{v_{c1}}{A_2} \frac{p_1 T_2 A_1}{T_1 p_2 A_2} - \frac{v_{c1}}{A_1} \right) = p_1 - p_2,$$

где второму выражению придадим удобную компактную форму:

$$m' \frac{v_{c1}}{A_1} \left(\frac{p_1 T_2 A_1^2}{T_1 p_2 A_2^2} - 1 \right) = p_1 - p_2 \quad (1.6)$$

Полученная таким образом пара уравнений (1.5) и (1.6) содержит всего две неизвестные величины p_2 и T_2 . В принципе из этих уравнений можно исключить одну из

неизвестных параметров p_2 , T_2 . Но, во-первых, дальнейшие преобразования приводят к громоздким алгебраическим выражениям.

Во-вторых, в этом нет большой необходимости, т.к. есть возможность применить метод последовательных приближений, и на основе такого подхода получить удовлетворительные для практического пользования рабочие формулы. В уравнении (1.5) основной вклад в величину температуры T_2 дает сумма $q + w^t$, а слагаемое с квадратной скобкой в правой части из-за относительно малой величины скорости v_{c1} существенно меньше суммы $q + w^t$.

Придадим уравнению (1.5) удобную форму:

$$T_2 = T_1 + \frac{q''}{c_p} - \frac{v_{c1}^2}{2c_p} \left[\left(\frac{p_1 T_2 A_1}{T_1 p_2 A_2} \right)^2 - 1 \right], \quad q'' = q + w^t \quad (1.7)$$

Тогда в качестве первого приближения $T_2^{(1)}$ для температуры на выходе из канала можно взять:

$$T_2^{(1)} = T_1 + \frac{q''}{c_p} \quad (1.8)$$

Это выражение используем в (1.6) вместо T_2 :

$$m' \frac{v_{c1}}{A_1} \left(\frac{p_1 T_2^{(1)} A_1^2}{T_1 p_2 A_2^2} - 1 \right) = p_1 - p_2$$

Умножив обе части полученного равенства на p_2 ,

$$m' \frac{v_{c1}}{A_1} \left(\frac{p_1 T_2^{(1)} A_1^2}{T_1 A_2^2} - p_2 \right) = p_2 p_1 - p_2^2$$

приведем к стандартной форме квадратного уравнения относительно неизвестной величины p_2 :

$$p_2^2 - p_2 \left(p_1 + \frac{m' v_{c1}}{A_1} \right) + \frac{m' v_{c1}}{A_1} \frac{p_1 T_2^{(1)} A_1^2}{T_1 A_2^2} = 0$$

Отсюда находим давление $p_2^{(1)}$ первого приближения:

$$p_2^{(1)} = \frac{\left(p_1 + \frac{m' v_{c1}}{A_1} \right) + \sqrt{\left(p_1 + \frac{m' v_{c1}}{A_1} \right)^2 - 4 \frac{m' v_{c1}}{A_1} \frac{p_1 T_2^{(1)} A_1^2}{T_1 A_2^2}}}{2} \quad (1.9)$$

Скорость $v_{c2}^{(1)}$ в первом приближений находится из формулы (1.4), где вместо p_2 и T_2 необходимо использовать $p_2^{(1)}$ и $T_2^{(1)}$ из формул (1.8) и (1.9). Тогда получим:

$$v_{c2}^{(1)} = \frac{p_1 T_2^{(1)} A_1}{T_1 p_2^{(1)} A_2} v_{c1} \quad (1.10)$$

Эта формула позволяет найти температуру $T_2^{(2)}$ на выходе из канала во втором приближении. Для этого необходимо вновь обратиться к формуле (1.7), где в левой части необходимо использовать для температуры T_2 и давления p_2 выражения (1.8), (1.9). Таким образом,

$$T_2^{(2)} = T_1 + \frac{q''}{c_p} - \frac{v_{c1}^2}{2c_p} \left[\left(\frac{p_1 T_2^{(1)} A_1}{T_1 p_2^{(1)} A_2} \right)^2 - 1 \right] \quad (1.11)$$

Хотя это уже второе приближение, удобство ее использования по сравнению с (1.8) очевидно: оно позволяет проследить за влиянием гидродинамических характеристик потока на температуру пламени (продуктов сгорания).

Дальнейшие действия сводятся к уточнению формы теплового эффекта q сгорания горючей смеси в зависимости от ее состава и технической работы w^t . Наибольший интерес представляет величина q , так как она может существенным образом меняться от степени разбавления окислителем (воздухом). Кроме того, тепловым эффектом определяется температура пламени, скорость которой наиболее сильно зависит от этой температуры.

Если скорость пламени недостаточно высока, то при заданном расходе газа пламя может быть просто вынесена из камеры сгорания или же произойдет погасание горения. И, наконец, есть еще одна причина, по которой стоит уделить большое внимание связи между скоростью пламени и степенью разбавления горючей смеси. Как показывает опыт, при сильном отклонении от стехиометрического состава горючей смеси, она просто перестает гореть. Это явление известно, как концентрационный предел горения (или распространения пламени).

Из всего сказанного становится ясно, как важно знать зависимость теплового эффекта химической реакции от степени обогащения или обеднения смеси. Поэтому приступим сейчас к поиску метода расчета теплового эффекта горения горючей смеси при различных степенях разбавления.

Модель, на основе которых рассматривались поведения термодинамических и гидродинамических параметров потока, несмотря на свою простоту, позволила проследить за изменениями таких выходных параметров, как скорость газа, температура и давление, плотность в зависимости от их значений на входе в камеру сгорания, а также от степени отклонения σ от стехиометрии исходной смеси. Заметим, эта степень отклонения непосредственно влияет на тепловой эффект химической реакции, являющимся одним из ключевых характеристик смеси.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

разработана простая алгебраическая модель (первого приближения) термодинамических и гидродинамических процессов, протекающих в канале вихревой горелки;

предложена методология расчета теплового эффекта химической реакции как функции от степени отклонения горючей смеси от стехиометрического состава и найдена соответствующая расчетная формула;

найжены приближенные и пригодные для практического пользования аналитические выражения для расчета основных термодинамических и гидродинамических параметров на выходной части камеры сгорания горелки;

на основе имеющихся в других литературных источниках экспериментальных данных показана применимость этой формулы в широком диапазоне изменения концентрации компонентов смеси, начиная от очень бедных до очень богатых смесей;

установлены концентрационные пределы горения для типичных газовых смесей на основе пропана, метана и др.;

показано, что низкий напор нагнетающего центробежного вентилятора приводит к относительно низкой скорости потока на выходе из камеры сгорания и снижению температуры пламени;

показано, что для обеспечения полного сгорания топлива лучше поддерживать в камере сгорания высокое давление.

Список использованных источников

- 1 Баубек А.А. Эксплуатационные материалы: учеб. для вузов / А.А.Баубек. – Нур-Султан: Фолиант, 2010. - 298 с.
- 2 Баубек А.А., Арпабеков М.И. Экологическая безопасность: монография / Palmarium Academic Publishing is a trademark of: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. Saarbrucken, Germany, 2014. – 379с.
- 3 Баубеков А.А., Арпабеков М.И., Байбек А.У. Экологические проблемы ДВС и пути их решения // Архитектура, градостроительство: состояние и перспективы и развития: Матер. Междунар. конф. Нур- Султан. 2008г. - С.186-189.
- 4 Баубек А.А., Сулейменов Т.Б., Арпабеков М.И., Экологические проблемы ДВС // Строительство, архитектура и транспорт: состояние и перспективы развития: Матер. респ. конф., Нур- Султан, 2011. С. 224-227.
- 5 Баубек А.А., Арпабеков М.И., Колатова А.А., Ыбрашева Н.Ч., Абилова К.М. Актуальные проблемы экологии природоиспользования в Астане // Актуальные проблемы транспорта и энергетики и пути инновационного поиска решения: Матер. Межд. конф., Нур- Султан, 2013г.– С.101-103.
- 6 Баубек А.А., Арпабеков М.И., Сансызбаева З.К. Проблемы улучшения экологических показателей ДВС // Современная архитектура, строительство и транспорт: проблемы и перспективы развития: Респ. конф., Нур- Султан 2007. –С.176-186.
- 7 Баубеков А.А., Арпабеков М.И. Защита окружающей среды от газов техногенного характера // Экологическая безопасность урбанизированных территории в условиях устойчивого развития: Матер. Междунар. конф, Нур- Султан, 2006. – С.316-322.
- 8 Экологическая безопасность окружающей среды в условиях устойчивого развития теплоэнергетики: аналитический обзор / А.А. Баубеков Арпабеков М.И. – АФ АО «НЦ НТИ», 2012. - 34 с.
- 9 Арпабеков М.И., Баубек А.А., Туленов А.Т., Куанышбаев Ж.М. Совершенствование классификации альтернативных моторных топлив по признакам // Вестн ЕНУ. Сер. тех. – 2016. –№ 2 (111) - С.118-122.
- 10 Арпабеков М.И., А.А.Баубек, Куанышбаев Ж.М., Каптагаева К.К. Формирование оценочных критериев энерго-экологической эффективности использования альтернативных моторных топлив // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения: Матер. IV Межд. конф. Ч.2, – Нур- Султан, 2016. – С.373-376.
- 11 Арпабеков М.И., Туленов А.Т., Шойбеков Б.Ж, Бекболатов Г.Ж. Программный комплекс по расчету токсичных выбросов отработавшими газами автотранспортных средств // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения: Матер. IV Межд. конф. Ч.2, Нур- Султан, 2016 - С.311-314.