

© А.А. ОЛЕННИКОВ, Е.А. ОЛЕННИКОВ, А.А. ЗАХАРОВ

*tgsu-sibsiu@mail.ru, olennikov@utmn.ru, azaharov@utmn.ru,*

УДК 669:519.876:5

### **ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АППАРАТА КИПЯЩЕГО СЛОЯ И ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В НЕМ**

*АННОТАЦИЯ. Рассмотрены модели газодинамики и теплообмена в аппаратах кипящего слоя, на основе моделей разработан программный комплекс для моделирования аппарата кипящего слоя.*

*SUMMARY. The models of gas dynamics and heat transfer in a fluidized bed apparatus, based on models developed software package for modeling the fluidized bed apparatus.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Высокотемпературные отходящие газы, синтез-газ, аппарат кипящего слоя, порозность, потери давления, теплообмен.*

*KEY WORDS. High-temperature exhaust gases, synthesis gas, the fluidized bed apparatus, porosity, pressure drop, heat transfer.*

Чтобы снизить вредное воздействие угля на окружающую среду, многие страны заняты поиском более эффективных и чистых способов преобразования угля в необходимую энергию. Одним из таких способов является газификация угля высокотемпературными отходящими газами от металлургических агрегатов. В результате газификации угля образуется высококалорийный газ (синтез-газ), который может применяться в газовых турбинах для выработки электроэнергии, в котельных агрегатах с целью выработки тепловой энергии для использования в системах отопления зданий или переработки в моторное топливо.

Выработка электроэнергии на основе процесса газификации угля обходится дороже, чем строительство обычной электростанции, однако экологические выгоды очевидны: синтез-газ можно очистить от серы, большинства токсичных окисей азота, тяжелых металлов и частиц, что гораздо труднее осуществить в дымовых трубах, когда уголь сжигают на обычных электростанциях. Количество отходов при этом незначительно: серу можно использовать в промышленных процессах, а минеральный остаток, который плавится и выпадает на дно газификатора в качестве шлака, можно применять при строительстве дорог. Более того, на международном уровне сейчас обсуждают политику и торговые рамки, обеспечивающие контроль выброса  $\text{CO}_2$  на электростанциях, и здесь газификация угля может стать хорошим техническим решением. Такая технология позволяет более эффективно использовать энергию, чем обычная электростанция со сжиганием угля, и позволяет сократить выбросы  $\text{CO}_2$  при том же количестве произведенной электроэнергии. Газификация угля открывает также возможность более дешевого и простого способа улавливания  $\text{CO}_2$ , который можно отводить по трубопроводам в подземное хранилище или закачивать в ис-

тощающиеся нефтяные пласты с целью повышения нефтеотдачи. Удаление  $\text{CO}_2$  из синтез-газа до его сжигания, когда концентрация  $\text{CO}_2$  высока и газы находятся под большим давлением, оказывается проще и требует меньших затрат, чем улавливание его в дымовых трубах, где давление ниже, и он находится в смеси с другими отработанными газами.

В настоящее время для газификации угля широко используют аппараты кипящего слоя (рис. 1). Аппарат кипящего слоя в общем виде состоит из пяти основных частей: решеток на основании и на куполе, цилиндрического корпуса и конусообразных переходов. Принцип действия такого аппарата следующий. Отходящий газ от металлургического процесса продувается через газораспределительную решетку, одновременно начинают подавать уголь определенной фракции. В результате каждая частичка угля омывается высокотемпературным газом, частицы становятся подвижными относительно друг друга.

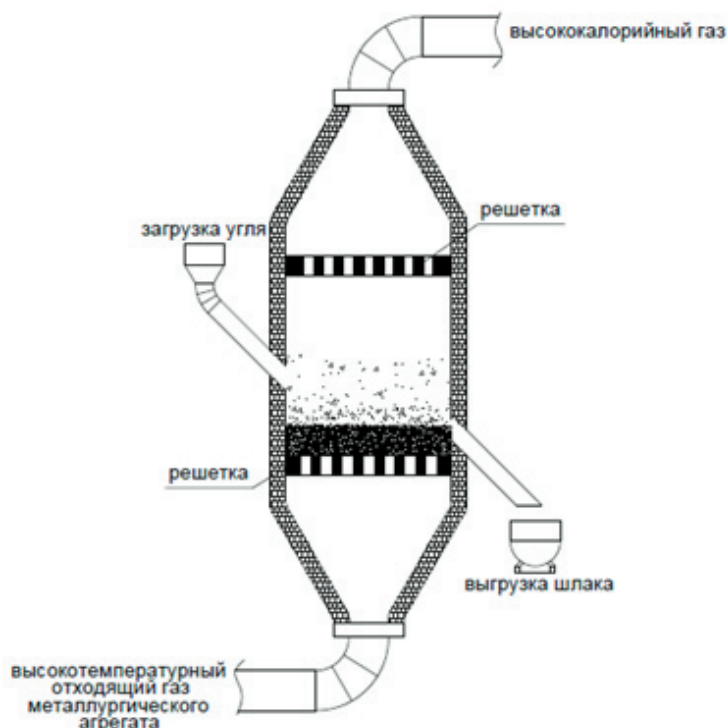


Рис. 1. Схема аппарата кипящего слоя

Основное условие перехода неподвижного слоя в псевдооживленное состояние выражается равенством перепада давления в слое насыпному весу. В развернутой форме это условие имеет вид:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = g(\rho_p - \rho) \cdot (1 - m_0),$$

где  $\Delta P$  — полный перепад давления в аппарате кипящего слоя, состоящий из двух составляющих, которыми являются насыпной слой и перфорированная решетка;  $H_0$  — высота слоя в состоянии покоя, м;  $\rho_p$ ,  $\rho$  — соответственно плот-

ности частицы и псевдоожигающей среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $m_0$  — порозность неподвижного насыпного слоя.

При непрерывной загрузке с одного конца аппарата уголь оседает на газораспределительной решетке, где оmyвается потоком высокотемпературного отходящего газа от металлургического агрегата. В результате химической реакции газ становится высококалорийным (примерный состав 60% —  $\text{CO}_2$  и 40% —  $\text{H}_2$ ), и отправляется на дальнейшую обработку. Отработанный уголь (шлак) удаляется из аппарата в накопительный бункер при помощи конвейера.

Таким образом, моделирование аппарата кипящего слоя является трудоемким процессом и требует достаточно большого количества времени для реализации. Для автоматизации процесса разработки и моделирования процессов аппарата кипящего слоя был разработан программный комплекс. Задачи, решаемые программным комплексом, представлены в виде структуры на рисунке 2.

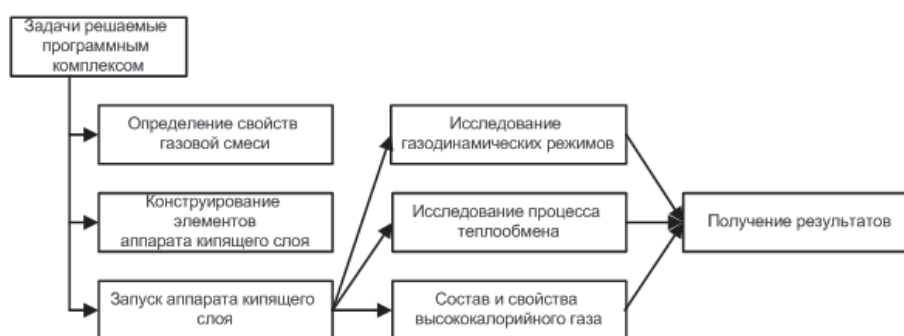


Рис. 2. Задачи решаемые программным комплексом

На первом этапе, согласно техническому условию, вводят требуемые данные отходящего газа (химический состав, физические данные, расход и калорийность), затем вычисляют термодинамические параметры отходящего газа на основе известных термодинамических законов. Далее приступают к конструктивному описанию аппарата кипящего слоя. В оконный интерфейс программы (рис. 3) вводятся диаметры аппарата кипящего слоя, диаметры и расстояния между отверстиями газораспределительных решеток и т.д. После этого приступают к моделированию процессов, протекающих в аппарате. Прежде всего, основное внимание уделено газодинамическому тракту. Определение потерь напора на трение является важнейшей задачей, возникающей при газодинамическом расчете аппарата. Для определения полных потерь давления в аппарате с учетом слоя угля, содержащегося в нем, можно определить из выражения [1]:

$$P_{KC} = \left(\frac{f}{F}\right)^2 \cdot \left(\frac{w}{F_C}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \left[ \left(1 + 0,707 \sqrt{1 - \frac{F}{f}}\right)^2 + \left(1,7 - \frac{F}{f}\right)^2 \right] + H_0 g (\rho_p - \rho) (1 - m_0),$$

где  $f$  — площадь решетки,  $m^2$ ;  $F$  — живое сечение решетки,  $m^2$  (площадь всех отверстий);  $w$  — скорость газового потока,  $m/c$ ;  $F_c$  — доля живого сечения решетки.

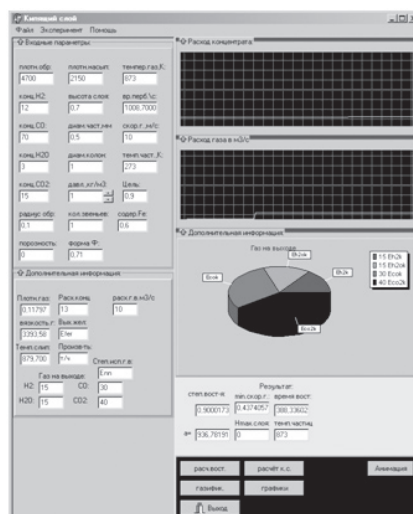


Рис. 3. Оконный интерфейс программного комплекса

Учитывая, что потери напора неразрывно связаны с профилем скоростей, для решения данной задачи необходимо установление закономерностей распределения скоростей по сечению потока. Вместе с тем, вопрос о распределении скоростей имеет первостепенное значение также для решения других инженерных задач в области теплопередачи, массообмена, гидро- и пневмотранспорта, измерения расходов угля и газа, так как профиль скоростей определяет интенсивность турбулентного обмена в различных точках потока и связанный с ней перенос тепла взвешенных твердых частиц.

Оба этих вопроса (распределение скоростей и газодинамическое сопротивление) получили полное теоретическое решение для случая ламинарного течения. Турбулентное течение до последнего времени не поддавалось теоретическому анализу, и определение потерь напора на трение и профиля скоростей при турбулентном течении в аппарате производилось (и производится частично в настоящее время) с помощью имеющих узкие пределы применимости эмпирических формул, результаты вычислений по которым часто расходятся.

Количество тепла, переданного от газа к слою в зависимости от времени пребывания в аппарате описывается выражением [2]:

$$Q = \alpha_{\Sigma} \left( T_g - \frac{T_H + T_K}{2} \right) \cdot S \cdot t,$$

где  $\alpha_{\Sigma}$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией, излучением и теплопроводностью,  $Вт/(m^2 \cdot град)$ ;  $T_g$  — температура газа, град.;  $T_H$ ,  $T_K$  — соответственно начальная и конечная температура загружаемого материала, град.;  $S$  — площадь поперечного сечения слоя,  $m^2$ ;  $t$  — время пребывания слоя в аппарате, секунды.

Значение коэффициента  $\alpha_{\Sigma}$  определяется зависимостью выражением:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{КНВ} + \alpha_{ЛУЧ} + \alpha_{КНД}$$

Конвективная составляющая теплообмена может быть определена по зависимости

$$\alpha_{КНВ} = 0,142(\lambda^{0,57} w^{0,8} p^{0,43} c^{0,43} (1 - m_{cm})^{0,133})(d^{0,2} v^{0,37} m_{cm}^{0,8}),$$

где  $\lambda$  — теплопроводность,  $w$  — скорость, м/с;  $p$  — давление, Па;  $c$  — теплоемкость;  $m_{cm}$  — порозность у теплообменной поверхности;  $d$  — диаметр частиц, м;  $v$  — кинематическая вязкость.

Коэффициент радиационного теплообмена рассчитывается по формуле

$$\alpha_{Л} = \sigma \varepsilon_{ПР} \left( \left( \frac{T_n + T_k}{2} \right)^2 + T_e^2 \right) \left( \frac{T_n + T_k}{2} + T_e \right),$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_{пр}$  — приведенная степень черноты.

Кондуктивный теплообмен между единицей поверхности и псевдооживленным слоем зависит от относительной площади, приходящейся на частицы

$$\alpha_{КНВ} = 8,95k/d(1 - m_{CT})^{2/3}.$$

Повышение температуры в аппарате с псевдооживленным слоем двояко сказывается на интенсивности внешнего теплообмена. Во-первых, происходит изменение теплофизических свойств дисперсного материала и оживающего агента. Во-вторых, усложняется механизм передачи энергии, существенным становится радиационный перенос, роль которого в низкотемпературных системах пренебрежимо мала. Главной особенностью процесса обмена излучением является необязательное наличие среды для передачи энергии.

Взаимодействие излучения с веществом — весьма сложный процесс, зависящий от множества факторов. Он реализуется тремя независимыми физическими механизмами: рассеянием, поглощением и излучением. Первые два обуславливают ослабление падающего излучения, последний усиливает его.

Программный комплекс содержит расширяемые базы данных, которые содержат справочно-нормативную и конструкторскую документации, необходимые в ходе разработки и исследования. Полученные результаты оцениваются экспертом, при необходимости вносятся коррективы в конфигурацию установки и выполняются перерасчеты.

Для наглядности процессов, протекающих в аппарате кипящего слоя создана имитационная модель, реализованная в среде программирования Delphi. При создании имитационной модели был учтен опыт и удобства работы со скандинавскими системами. Одно из назначений систем визуализации — отображение технологического процесса в реальном времени (рис. 4).

Созданная модель позволяет наблюдать процесс в динамике и статике. На графиках, расположенных справа на рис. 3, отражается динамика процессов в аппарате. Кнопка «анимация», находящаяся в правом нижнем углу главной формы, вызывает форму анимации процесса псевдооживления. Формы могут работать параллельно и дополнять друг друга.



Рис. 4. Имитационная модель аппарата кипящего слоя

Использование данного программного комплекса экономит значительную часть времени на проектирование, а использование технологий баз данных дает возможность накапливать проектные решения и производить мгновенные перерасчеты с изменением входных параметров. Программный продукт можно использовать не только для целей проектирования и научных исследований, но также в качестве обучающей системы для технологического персонала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оленников А.А., Цымбал В.П. Варианты и оценка эффективности использования вторичных энергоресурсов для агрегатов жидкофазного восстановления // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2008. №6. С. 43-51.
2. Оленников А.А., Цымбал В.П. Программный комплекс для моделирования вариантов утилизации энергии от агрегата типа СЭР // Системы управления и информационные технологии. 2009. Вып. 2.2(36). С. 277-280.