

Таким образом, по результатам расчетов было получено, что применение тангенциального навала с прогибом до 5 % по дуге допустимо; также возможна корректировка собственных частот лопатки для согласования вибрационной диаграммы за счёт изменения изгибной и изгибно-крутильной жесткости. Решен вопрос обеспечения прочностных характеристик лопаток с пространственным профилированием, которые требуют уточнённых методов расчёта прочности.

Так же подтверждено, что использование лопаток с тангенциальным навалом повышает эффективность ОК [3] и тем самым повышают эффективность ГТУ в целом.

#### Список использованных источников

1. Карпов Ф. В. Пространственное профилирование рабочей лопатки высокоперепадной турбины / Ф. В. Карпов, А. Н. Печенкин, Р. В. Храмин // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели : тез. докл. XII межвуз. конф. М. : МГТУ, 2004. С. 40-41.
2. Шелковский М. Ю. Метод аэродинамической оптимизации лопаточных венцов компрессора // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 8 (105). С. 108-115.
3. Бойко А. В. Численное исследование влияния сложного тангенциального навала на характеристики кольцевой реактивной турбинной решетки / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, А. П. Усатый, М. В. Бурлака // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование : сборник. Харьков : НТУ ХПИ 2009. № 3. С. 18-22.

УДК 662.76

Овчарников А. О., Абаимов Н. А.  
Уральский федеральный университет  
strogg300@yandex.ru

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВНУТРИПОРИСТОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА

**Аннотация.** В работе обоснована необходимость проведения мероприятий по повышению энерго- и ресурсосбережения в области твёрдотопливной энергогенерации. Газификация твёрдого топлива предложена в качестве одного из данных мероприятий. Приведены основные модели, описывающие наиболее сложные режимы газификации - внутрипористое реагирование, диффузия и фильтрация реагентов и продуктов химических реакций.

**Введение.** В России средний КПД угольных электростанций не превышает 30-35 %, что демонстрирует большой потенциал для повышения энерго- и ресурсосбережения в области твёрдотопливной энергогенерации. Одним из главных путей повышения КПД угольных станций является использование парогазовых установок с внутрицикловой газификацией. Процесс газификации может происходить в разных режимах в зависимости от температуры и давления в реакторе. Наиболее сложные режимы газификации связаны с внутрипористым реагирова-

нием, осложнённым процессами фильтрации и диффузией реагентов и продуктов реакций. Основоположниками изучения и описания этих процессов считаются Э. У. Тиле, Я. Б. Зельдович и Г. Дамкёллер.

Модель Дамкёллера. Дамкёллер, будучи немецким инженером и химиком, исследовал факторы, влияющие на скорость химической реакции. Результатом его исследований стала разработка ряда критериев подобия, названных Числами Дамкёллера. Они определяют собой отношение скорости химической реакции к скорости других процессов, происходящих в системе. В общем случае эти критерии можно выразить, как отношение характерного времени физического процесса  $t_{phys}$  к характерному времени химической реакции  $t_{chem}$ :

$$Da = \frac{t_{phys}}{t_{chem}} \quad (1)$$

Например выражение 2-го Числа Дамкёллера [1], применяемого при описании процессов осложнённых диффузией, имеет вид:

$$Da_2 = \frac{kC_0^{n-1}L^2}{D}, \quad (2)$$

где  $k$  – константа скорости реакции,  $C_0$  – начальная концентрация,  $n$  – порядок реакции,  $L$  – характерный размер,  $D$  – коэффициент диффузии.

Модель Зельдовича. Советский учёный Зельдович исследовал скорость реакции, проходящей на порошкообразном материале [2]. Он рассматривал влияние степени труднодоступности поверхности катализатора для реагирующих веществ на эффективную скорость химической реакции.

В его работе установлено, что отношение скорости реакции на пористом материале к скорости на гладком катализаторе пропорционально отношению полной поверхности пор к внешней поверхности гладкого катализатора, поэтому, чтобы добиться максимальной скорости реакции необходимо использовать вещество в пористом виде.

Математическое условие перехода из переходной области реагирования в кинетическую область имеет следующий вид:

$$\xi = \sqrt{C_0^{1-n}} \cdot \sqrt{\frac{D}{KS}} = r_0; \quad r_0^2 \cdot C_0^{n-1} \cdot \frac{KS}{D} = 1, \quad (3)$$

где  $r_0$  – радиус куска катализатора,  $S$  – удельная поверхность единицы объема пористого материала. В такой форме выведено условие проникновения реакции до середины куска.

Модель Тиле. Тиле, работая американским инженером-нефтяником, исследовал влияние различных факторов на скорость реакции на порошкообразном катализаторе [3]. Он выяснил, что одним из главных факторов является размер частиц катализатора, и чем меньше размер этот размер, тем быстрее проходит реакция. Также он вывел безразмерный модуль, характеризующий скорость реакции.

Модуль Тиле представляет собой отношение характерного размера катализатора  $L$  (для пористых катализаторов  $L$  определяется как характерный размер зерна катализатора) к эффективной глубине проникновения реакции в толщу по-

ристого катализатора, которая определяется как корень квадратный из отношения эффективного коэффициента диффузии к характерному значению скорости реакции:

$$\Psi = L \sqrt{\frac{k}{D} \cdot c_0^{n-1}}, \quad (4)$$

где  $L$  – характерный размер твердой частицы. Этот модуль по смыслу схож с числами Дамкёллера и Зельдовича.

Уравнение Тиле-Зельдовича. Несмотря на то, что исследование кинетики Зельдович и Тиле проводили независимо друг от друга, они практически одновременно опубликовали результаты в 1939 г., хотя, вероятно, Зельдович сделал это раньше Тиле. Дамкёллер же опубликовал свои вычисления в 1937 г., и они были схожи с уравнениями, которые искал Тиле для своей модели [4]. В конечном итоге был разработан коэффициент, который сводит воедино работы двух ученых (уравнение Тиле-Зельдовича):

$$D \left( \frac{d^2 c_a}{dx^2} \right) - \rho_p S R(C) = 0, \quad (5)$$

где  $X$  – координата расстояния в грануле,  $\rho_p$  – плотность катализатора,  $R$  – скорость реакции.

Модуль Тиле-Зельдовича широко используется в химическом машиностроении для описания кинетики реакции. Также этот модуль применяется в вычислительных моделях гетерогенных термохимических процессов [5].

Заключение. На кафедре ТЭС ведутся комплексные исследования, связанные с лабораторным изучением свойств твёрдых топлив [6], экспериментальной отработкой методов газификации угля, а также численным моделированием работы поточных газификаторов [7]. В этой работе используются вышеописанные модели, позволяющие оптимизировать мероприятия по повышению эффективности в области твёрдотопливной энергетики.

#### Список использованных источников

1. Hall C. W. Laws and models: science, engineering, and technology. CRC Press, 1999. 560 p.
2. Зельдович Я. Б. К теории реакции на пористом или порошкообразном материале // Журнал физической химии. 1939. Т. 13. Вып. 2. С. 163-168.
3. Thiele E. W. Relation between catalytic activity and size of particle // Industrial and engineering chemistry. 1939. № 31(7). P. 916-920.
4. Thiele E.W. About relation between catalytic activity and size of particle // This Week's Citation Classic. 1979. № 2. P. 237.
5. Wei Huo, Zhijie Zhou, Fuchen Wang, Guangsuo Yu, Mechanism analysis and experimental verification of pore diffusion on coke and coal char gasification with CO<sub>2</sub> // Chemical Engineering Journal. 2014. № 244. P. 227-233.
6. Худякова Г. И., Осипов П. В., Рыжков А. Ф. Конверсия кокса антрацита в воздушной среде при разных расходах окислителя // Научное обозрение. 2014. № 8-1. С. 139-144.
7. Абаимов Н. А., Рыжков А. Ф. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 3–8.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).*