Показано, что увеличение толщины стенки сказывается на уменьшении среднего числа Нуссельта на поверхности нагревателя. Степень понижения обобщенного коэффициента теплообмена зависит и от теплопроводности материала стенок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jaluria Y. Design and Optimization of Thermal Systems. N.Y.: McGraw-Hill, 1998. – 626 p.
- Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1991. – Т. 1. – 678 с.
- 3. Bejan A. Convection Heat Transfer. N.Y.: Wiley, 2004. 696 p.
- Liaqat A., Baytas A.C. Numerical comparison of conjugate and nonconjugate natural convection for internally heated semi-circular pools // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2001. – V. 22. – P. 650–656.
- Liaqat A., Baytas A.C. Conjugate natural convection in a square enclosure containing volumetric sources // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2001. – V. 44. – № 17. – P. 3273–3280.
- Mobedi M. Conjugate natural convection in a square cavity with finite thickness horizontal walls // Int. Comm. Heat Mass Transfer. – 2008. – V. 35. – № 4. – P. 503–513.
- Li-Zhi Zhang, Cai-Hang Liang, Li-Xia Pei Conjugate heat and mass transfer in membrane-formed channels in all entry regions // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2010. – V. 53. – № 5–6. – P. 815–824.
- Cheng Y.P., Lee T.S., Low H.T. Numerical simulation of conjugate heat transfer in electronic cooling and analysis based on field synergy principle // Applied Thermal Engineering. – 2008. – V. 28. – № 14–15. – P. 1826–1833.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг. (ГК № П2225), а также при финансовой поддержке Президента Российской Федерации (МК-396.2010.8).

- Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Двумерная задача естественной конвекции в прямоугольной области при локальном нагреве и теплопроводных границах конечной толщины // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2006. – № 6. – С. 29–39.
- Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Математическое моделирование тепломассопереноса в условиях смешанной конвекции в прямоугольной области с источником тепла и теплопроводными стенками // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15. – № 1. – С. 107–120.
- Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
- Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
- Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
- Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
- Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

Поступила 08.06.2010 г.

УДК 621.1.0161.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРОВОЙ ФАЗЫ ПРИ ПРОСТОЙ ПЕРЕГОНКЕ ВЕЩЕСТВ

Д.В. Феоктистов, В.С. Логинов

Томский политехнический университет

E-mail: dmitrytpu@inbox.ru

Составлен тепловой баланс заводского перегонного аппарата АРНП-2 с экспериментальными замерами величин, входящих в корреляции по определению фактически используемых теплот. Проведен анализ эмпирически полученных термограмм однокомпонентных и бинарных водных жидкостей в процессе нагрева и охлаждения в ходе, которого выявлены границы интервалов изменения температур в зависимости от состава разгоняемых веществ. Найдены корреляции изменения температуры паровой фазы в процессе прогрева (I интервал) и охлаждения (V интервал) при простой перегонке веществ.

Ключевые слова:

Тепловой баланс, перегонка, опытные данные, термограмма.

Key words:

Heat balance, distillation, experimental data, thermogram.

Задача расчета процесса однократной перегонки часто формулируется следующим образом: дан исходный раствор известного состава, требуется отогнать от него определенную долю легколетучего компонента и рассчитать, каковы должны быть составы образующихся фаз и температура процесса [1]. Состав равновесных фаз, отвечающих заданной степени отгона, чаще всего определяется путем совместного решения уравнений материального баланса и фазового равновесия.

Прогнозирование необходимой температуры для отгона легколетучего компонента представляется возможным, если использовать диаграмму y-x-t [1]. Данный графический способ не дает решение поставленной задачи относительно времени проведения процесса перегонки до необходимой температуры.

При решении поставленной задачи сократится время на организацию последующей перегонки, появится возможность планирования времени необходимого подвода тепла, обеспечивающего заданные параметры отгона.

В данной работе приведены результаты опытных исследований температуры паров при простой перегонке на заводском аппарате АРНП-2 для следующих бинарных и однокомпонентных жидкостей: этиловый спирт — дистиллированная вода и дистиллированная вода.

Эскиз заводского перегонного аппарата представлен на рис. 1.



Рис. 1. Перегонный аппарат АРНП-2: 1) основание (стол); 2) спираль; 3) охлаждающая баня; 4) электронное устройство; 5) датчик температуры; 6) регулятор вертикального перемещения электронагревателя; 7) управляющий рычаг; 8) подъемный столик; 9) кронштейн для термопары; 10) тумблер включения вентилятора; 11) вентилятор; 12) колба Вюрца; 13) нагревательный элемент

Для измерения количества выделяемого тепла спиралью нагрева *EL*1 аппарат содержит вольтметры *PA*1, *PA*2 и эталонное сопротивление *R* в 0,01 Ом, рис. 2. Используя закон Ома и методику обработки экспериментальных данных [2-8], определена мощность нагревательного элемента с шагом нагрузки 10 %, табл. 1.

Для заводского перегонного аппарата АРНП-2 составлен тепловой баланс:

$$Q_{\text{спир.}} = Q_{\text{п.o.с.}} + Q_{\text{н.u.o.}} + Q_{\text{дист.}} + Q_{\text{куб.}} + Q_{3.y.},$$

где $Q_{\text{спнр.}}$ — тепло, выделяемое спиралью нагрева за время работы перегонного аппарата τ , Дж; $Q_{\text{п.о.с.}}$ — потери теплоты в окружающую среду с нижней поверхности открытой спирали, Дж; $Q_{\text{н.н.о.}}$ тепло, затраченное на нагревание до температуры кипения, испарение и охлаждение перегоняемого вещества, Дж; $Q_{\text{дист.}}$ — тепло дистиллята, Дж; $Q_{\text{куб.}}$ тепло кубового остатка, Дж; $Q_{3\text{у.}}$ — тепло, воспринятое элементами установки, Дж.



Рис. 2. Электрическая схема измерения мощности

Таблица 1. Результаты определения мощности выделяемой спиралью нагрева

| Мощность нагрева, % | Истинное значение Q, Вт | |
|---------------------|-------------------------|--|
| 10 | 1,84 | |
| 20 | 10,89 | |
| 30 | 37,44 | |
| 40 | 85,26 | |
| 50 | 147,80 | |
| 60 | 219,90 | |
| 70 | 265,20 | |
| 80 | 400,10 | |
| 90 | 490,00 | |
| 100 | 581,40 | |

Эмпирические результаты по установлению составляющих теплового баланса сведены в табл. 2.

| Таблица 2. 1 | Тепловой | баланс п | ерегонного | аппарата | ΑΡΗΠ-2 |
|--------------|----------|----------|------------|----------|--------|
|--------------|----------|----------|------------|----------|--------|

| Составляющая теплового баланса | % | |
|--------------------------------|--------|--|
| Q _{спир.} | 100,00 | |
| Q _{n.o.c.} | 50,00 | |
| Q _{к.и.к.} | 43,43 | |
| Q _{э.y.} | 4,57 | |
| <i>Q</i> куб. | 1,80 | |
| <i>Q</i> дист. | 0,20 | |

Анализ термограмм, полученных экспериментально перегонкой водных растворов, выявил интервалы изменения температуры паров, рис. 3. Рассмотрим их на опыте по дистилляции дистиллированной воды, 40 % раствора этилового спирта в дистиллированной воде при мощности нагрева 122,81 Вт.

Определяем интервалы изменения температуры паров при простой перегонке водных растворов:





I – разогрева от запуска установки до начала быстропротекающего во времени возрастания температуры паров;

II – интенсивного возрастания температуры до кипения низкокипящего компонента;

III – полного испарения легколетучего компонента;

IV – испарения высококипящего компонента, стационарный режим температуры паров. В данный интервал времени включен промежуток удержания температуры паров, после прекращения подвода тепла за счет аккумулирования тепла системой колба Вюрца – бинарная смесь.

V – охлаждения паров.

Графический метод определения границ интервалов дает их грубую первоначальную оценку. Для более точного определения границ перехода температурной кривой из одного интервала в другой необходимо вычислить мгновенную скорость изменения теплового состояния паров перегоняемого вещества во всем диапазоне термограммы по формуле:

$$\omega_T = \frac{t}{\tau}, \frac{^{\circ}\mathrm{C}}{\mathrm{c}}$$

Экстремумы мгновенной скорости теплового состояния паров будут соответствовать границе перехода из одного интервала в другой.

Сравнение с термограммой однокомпонентной смеси (дистиллированная вода, рис. 3) I интервал не имеет зависимости от состава. Наклон кривой II интервала, правая граница которого зависит только от начала температуры кипения низкокипящего

компонента, однотипен. III интервал имеет значительное увеличение временных рамок с учетом равенства объемов дистиллята и кубового остатка. IV интервал отсутствует, что объясняется составом вещества. Кривые V интервала имеют однонаправленность, что свидетельствует об индифферентности процесса охлаждения паров веществ к составу.

Для аналитического определения температуры паров используем уравнение термически тонкого тела в частном случае, когда входящие в уравнения коэффициенты не зависят от времени. Его решение имеет вид:

$$t = t_{w} + (t_{0} - t_{w}) \exp\left(-\frac{kF\tau}{C_{k}}\right) + \frac{Q}{kF}\left[1 - \exp\left(-\frac{kF\tau}{C_{k}}\right)\right],$$
(1)

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м^{2°}С); C_k — среднемассовая теплоемкость, Дж/°С; F — поверхность теплообмена, м²; τ — время, с; t_w — начальная температура смеси, °С; t_0 — температура окружающей среды, °С; Q — полезно используемое тепло, подводимое к аппарату, Дж.

В V интервале подвод тепла отсутствует, соответственно ур. (1) преобразуется:

$$t = t_w + (t_0 - t_w) \exp\left(-\frac{kF\tau}{C_k}\right).$$
 (2)

Входящие в последнюю зависимость величины среднемассовой теплоемкости и коэффициент те-

плопередачи значительно изменяются во времени. Для их усредненного вычисления выделим на кривой V интервала два участка в начале (А) и конце процесса охлаждения (В), рис. 3.

Используя правило аддитивности, определяем среднемассовую теплоемкость системы колба Вюрца — бинарная смесь. Находим по зависимости (2) на начальном участке А рис. 3 среднеарифметический коэффициент теплопередачи в интервале не менее 200 с. За начала отсчета времени принимаем момент падения температуры. Аналогично на интервале В рис. 3 вычисляем среднемассовую теплоемкость по известному коэффициенту теплопередачи. Аналогичные расчеты проводим для эксперимента по перегонке дистиллированной воды, результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты определения коэффициента теплопередачи и среднемассовой теплоемкости на V интервале охлаждения

| Температура Время интерезла | | Среднемассо- | Коэффициент | | |
|---------------------------------------------|-------------------|--------------|---------------|--|--|
| °C | с | вая теплоем- | теплопереда- | | |
| C | C | кость, Дж/°С | чи, Вт/(м²°С) | | |
| Систем | спирт | | | | |
| 99,9 | 2 | | 14,90 | | |
| 94,3 | 38 | | 46,35 | | |
| 85,1 | 88 | 549.05 | 55,81 | | |
| 81,6 | 118 | 540,05 | 52,78 | | |
| 78,3 | 153 | | 49,29 | | |
| 68,5 | 238 | | 50,11 | | |
| Среднеа | арифметическое зн | ачение | 44,88 | | |
| 25,4 | 1438 | 550,59 | | | |
| 26,2 | 1318 | 531,90 | | | |
| 27,3 | 1198 | 516,46 | 44,88 | | |
| 29,3 | 1048 | 502,60 | | | |
| 30,2 | 998 | 500,12 |] | | |
| Среднеарифметическое значение | | 520,33 | | | |
| Система колба Вюрца – дистиллированная вода | | | | | |
| 99,5 | 13 | | 11,76 | | |
| 98,0 | 24 | | 25,73 | | |
| 94,2 | 58 | | 31,60 | | |
| 91,7 | 78 | 548,80 | 34,28 | | |
| 87,4 | 123 | 1 | 34,04 | | |
| 82,3 | 173 | | 35,35 | | |
| 79,5 | 203 | | 35,70 | | |
| Среднеарифметическое значение | | | 29,78 | | |
| 26,6 | 1793 | 443,14 | | | |
| 27,2 | 1673 | 431,47 | | | |
| 28,0 | 1553 | 422,18 | 29,78 | | |
| 28,5 | 1493 | 418,48 | | | |
| 29,5 | 1373 | 407,70 | | | |
| Среднеарифметическое значение | | 424,59 | | | |

Найденные величины подставляем в ур. (2), определяя изменение температуры паров в процессе охлаждения. В сопоставлении с опытными данными, рис. 3, максимальная относительная погрешность не превышает 3 %. Используя основное уравнение элементарной теории тепловой инерции тел и систем, составим равенство по определению температуры паров в I интервале:

$$t = t_{w} + (t_{0} - t_{w}) \exp\left(-\frac{kF\tau}{C_{k}}\right) + \exp\left(-\frac{kF\tau}{C_{k}}\right) \int_{\tau_{0}}^{\tau} \exp\left(\frac{kF\tau}{C_{k}}\right) \Psi'(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $\Psi(\tau) = 8 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 0.01 \tau + t_w$.

После элементарных преобразований ур. (3) окончательно получим:

$$t = t_{w} + (t_{0} - t_{w}) \exp\left(-\frac{kF\tau}{C_{k}}\right) + \left(\frac{16 \cdot 10^{-5} C_{k} \left(C_{k} \exp\left(-\frac{kF\tau}{C_{k}}\right) - C_{k} + \tau Fk\right) + \right)}{+0.01 C_{k} Fk \left(\exp\left(-\frac{kF\tau}{C_{k}}\right) - 1\right)}.$$

$$(4)$$

По выше описанной методике для V интервала охлаждения паровой фазы определяются среднеарифметический коэффициент теплопередачи и среднеарифметическая среднемассовая теплоемкость для I интервала прогрева рассматриваемых перегоняемых жидкостей. Найденные величины подставляем в ур. (4), вычисляя изменение температуры в I интервале для 40 % раствора этилового спирта в дистиллированной воде и дистиллированной воды. Результаты представлены графически на рис. 3, кривые 5 и 6, в сопоставлении с опытными данными максимальная относительная погрешность не превышает 3 %.

Выводы

+

Приведены результаты эмпирических исследований температуры паров при простой перегонке водных растворов. Предложен тепловой баланс заводского перегонного аппарата с экспериментальными замерами величин используемых теплот. На основе анализа термограмм, полученных опытным путем при перегонке водных жидкостей, выявлены интервалы изменения температуры паровой фазы, которые могут быть использованы при расчете массообменного оборудования. Для прогнозирования изменения температуры паровой фазы при перегонке водных бинарных растворов в процессе охлаждения и в период разогрева установлены корреляции межлу изменением температуры паровой фазы и временем (экспоненциальная зависимость) с относительной погрешностью не более 3 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. – М.: Химия, 1974. – 439 с.
- Илларионов А.Г., Сасин В.Я. Методы обработки экспериментальных данных в исследованиях теплотехнологических процессов. – М.: МЭИ, 1987. – 62 с.
- Ушева Н.В., Кравцов А.В. Макрокинетика химических процессов и расчет реакторов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 100 с.
- Воскресенский П.И. Начала техники лабораторных работ. М.: Химия, 1971. – 223 с.
- Захаров Л.Н. Начала техники лабораторных работ. Л.: Химия, 1981. – 191 с.
- Крель Э. Руководство по лабораторной ректификации. М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 631 с.
- Мановян А.К. Лабораторная перегонка и ректификация нефтяных смесей. – М.: Химия, 1984. – 236 с.
- Розенгарт М.И. Техника лабораторной перегонки и ректификации. – М.-Л.: Госхимиздат, 1951. – 194 с.

Поступила 29.04.2010 г.

УДК 662.6;519.6

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СЛОЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО ТОПЛИВА

В.В. Жолобов, И.А. Иванова

Томский политехнический университет E-mail: study@tpu.ru

Предложена математическая модель для описания в двухскоростном, двухфракционном, двухтемпературном приближении механики гетерогенных сред осесимметричного движения смеси продуктов сгорания воспламенителя и слоя гранулированного топлива. В качестве приложения модели проведен расчет процесса, имитирующего взаимодействие капсюльной втулки с навеской дымного пороха и слоем гранулированного топлива.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, осесимметричные течения, гетерогенные среды, численные методы, фронт пламени.

Key words:

Mathematical modeling, acsial-symmetric flows, heterogeneous environments, numerical methods, flame front.

Процесс взаимодействия запыленного газа (микрогетерогенной дисперсной системы) с пористой средой имеет место в продуктивных пластах при разработке газоконденсатных месторождений, при трубопроводной транспортировке природного газа и в газовых фильтрах различного типа.

Аналогичный процесс возникает также при движении продуктов сгорания в двухфазных средах с дисперсионной фазой из унитарного топлива. Отличительной особенностью таких дисперсных систем является непрерывное изменение структуры дисперсной фазы от среды со связной структурой к среде с несвязной зернистой структурой.

В последнем случае наибольший прикладной интерес представляет установление закономерностей распространения фронта пламени (поверхности, отделяющей область с наличием фазового перехода от области, где последний отсутствует). Несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам горения отдельных элементов и всей дисперсной системы в целом (неполный обзор работ этого направления дан в [1]), имеется ограниченное число публикаций, рассматривающих вопросы численного расчета совместной динамики процессов инициирования, воспламенения и движения горящей дисперсной системы. Сложности вычислительного характера в основном связаны с необходимостью расчета процессов, имеющих различный масштаб по пространству. Наиболее подходящий метод решения задач газовой динамики для этого случая предложен С.К. Годуновым [2]. Основу метода составляет идея о применении решения задачи Римана (включение в разностную схему элементарных решений уравнений газовой динамики) для определения потоков на границе ячеек разностной сетки. В данной работе метод С.К. Годунова по аналогии с [3] рассматривается как формальная процедура, приводящая к устойчивой разностной схеме. Вместо точного решения задачи Римана для уравнений движения несвязных дисперсных систем используется их приближенное аналитическое решение.

Имеется мало публикаций, в которых при построении разностной схемы применяется распределение параметров по длине ячейки. Причем в имеющихся публикациях [4] отсутствует привязка к аналитическим решениям исходной системы уравнений. В данной работе идея С.К. Годунова о применении элементарных аналитических решений уравнений газовой динамики для определения параметров на границе ячеек разностной сетки распространяется на распределение параметров внутри ячеек. По аналогии с классическим (термодинамическим) приближением [5] для скорости и давления предлагается использовать линейное и квадратичное распределение соответственно.