Назмутдинов А.Ф.¹, Назмутдинов Ас.Ф.²¹ООО «Гапромнефть-НТЦ»

Санкт-Петербург, Россия

²Московский государственный университет

Москва, Россия

doi: 10.18411/lj2016-6-2-11

Установления равновесия жидкости и газа в замкнутом объеме

Имеется замкнутая теплоизолированная емкость постоянного объема (V). В емкости находится жидкий пропан и вода (в совокупности занимают объем V_0) при определенной температуре (T_0). Над жидкостями – вакуум.. Нижние индексы: l соответствует жидкому пропану, g - газообразному пропану, w - жидкой воде и v - пару воды.

Рассматривается процесс перехода системы к равновесию. Данный процесс описывается уравнение теплового баланса [1-9]:

$$\dot{m}_l r_l + \dot{m}_w r_w + m_l c_{pl} \frac{dT}{dt} + m_g c_{vg} \frac{dT}{dt} + m_v c_{vv} \frac{dT}{dt} + m_w c_{pw} \frac{dT}{dt} = 0,$$

где $\dot{m}_j = -\frac{dm_j}{dt}$ – скорость испарения j – го вещества; r_j – удельная (скрытая) теплота парообразования j – го вещества; c_{vj} – теплоемкость j – го газа (при $V = const$), c_{pj} – теплоемкость j – й жидкости (при $p = const$).

Это уравнение разрешается относительно $\frac{dT}{dt}$, добавив к уравнению баланса, уравнения скорости испарения, относительно 3-х ОДУ ($\frac{dT}{dt}, \frac{dm_l}{dt}, \frac{dm_w}{dt}$), которая решается численно:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-(\dot{m}_l r_l + \dot{m}_w r_w)}{m_l c_{pl} + (m_{l0} - m_l) c_{vg} + (m_{w0} - m_w) c_{vv} + m_w c_{pw}},$$

$$\frac{dm_l}{dt} = -\dot{m}_l = \alpha_l (p_l^* - p_l),$$

$$\frac{dm_w}{dt} = -\dot{m}_w = \alpha_w (p_v^* - p_v),$$

при выполнении уравнения состояния: $p_j = \rho_j R_j (T + 273.15)$ - Клапейрона и закона Дальтона: $p = p_v + p_g$ (где p_v и p_g - парциальные давления).

Жидкости считаются несжимаемыми, т.е. $\rho_l = const, \rho_w = const$; $c_{vv} = c_{vv}(p, T) = (c_{pv}(p, T) - R_v)$ - аппроксимируется многочленом 2-го порядка по p , коэффициенты которого аппроксимируются многочленом 2-го порядка по T ; остальные теплоемкости аппроксимированы для некоторого фиксированного значения p линейной функцией: $c_{pw} = c_{pw}(T), c_{vg} = c_{vg}(T) = (c_{pg}(T) - R_g), c_{pl} = c_{pl}(T)$; удельная теплота парообразования аппроксимирована для некоторого p многочленами 2-го порядка: $r_l = r_l(T), r_w = r_w(T)$; давление насыщенных паров пропана аппроксимировано по формуле Антуана $\ln p^*(T) = A - \frac{B}{T+273.15+C}$ (мм рт. ст.), где A, B, C - табличные данные; давление насыщенных паров воды, как и в случае, описанном выше, найдены более точной формулой.

При расчетах использовались следующие формулы:

$$c_{pv}(T, p) = [(0.000000012688374 * T^2 - 0.000010323694739 * T + 0.002132674736069) * p^2 / 10^{10} + (-0.000000105361647 * T^2 + 0.000024603860694 * T + 0.013223331613543) * p / 10^5 + (0.000000175596031 * T^2 + 0.000517190163502 * T + 1.826753648960001)] * 1000 \text{ Дж/кг*град},$$

$$c_{pw}(T) = (-0.0014 * T + 2.6464) * 1000 + 1500 \text{ Дж/кг*град},$$

$$c_{pl}(T) = (0.0022 * T + 2.2863) * 1000 \text{ Дж/кг*град},$$

$$c_{pg}(T) = (2.1744 + 0.0017 * T) * 1000 + 2000 \text{ Дж/кг*град},$$

$$r_l(T) = (-0.014 * T^2 - 1.79 * T + 387.3) * 1000 \text{ Дж/кг},$$

$$r_w(T) = (-0.015 * T^2 + 0.763 * T + 2398) * 1000 \text{ Дж/кг}.$$

Использованы те же выражения для давления насыщенных паров.

В выражениях $\dot{m}_j = -\alpha_j (p_j^* - p_j)$ $\alpha_j = \text{const} > 0$, причем, от величины этих констант зависит только скорость выхода на равновесия, поэтому, их выбор был обусловлен физичностью процесса.

На Рис.1-4 представлены результаты расчетов при различных исходных параметрах.

Рис.1

Рис.2

Рис.3

Рис.4

Полученные результаты позволяют определить темп, конечное значение и особенности перехода системы к равновесию.

Литература:

1. Назмутдинов А.Ф., Назмутдинова Л.Р. Особенности движения частиц по окружности со столкновениями. В сборнике: Актуальные вопросы современных математических и естественных наук. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. 2016. С. 16-18
2. Reid R., Prausnitz J., Sherwood T. The Properties of Gases and Liquids. 1982.
3. Хабибуллин И.Л., Хамитов А.Т., Назмутдинов Ф.Ф. Особенности тепло- и массопереноса в пористых средах при фазовых превращениях при электромагнитном нагреве. В сборнике: Основные проблемы естественных и математических наук Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Инновационный центр развития образования и науки. 2014. С. 23-26.
4. World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 2008.
5. Назмутдинова Л.Р., Назмутдинов Ф.Ф. Модель высокочастотного электромагнитного воздействия на кинетику химических реакций. Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2015. № 8-1. С. 20-23
6. Хабибуллин И.Л., Хамитов А.Т., Назмутдинов Ф.Ф. Исследование динамики фазовых переходов в пористых средах, инициируемых нагревом электромагнитным излучением. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-5. С. 2556-2557.
7. Khabibullin I.L., Khamitov A.T., Nazmutdinov F.F. Modeling of heat and mass transfer in porous media at phase transitions initiated by microwave heating. High Temperature. 2014. V. 52. № 5. pp. 697-702.
8. Хабибуллин И.Л., Назмутдинов Ф.Ф. К теории нагрева сред электромагнитным излучением. Вестник Башкирского университета. 2014. Т. 19. № 2. С. 381-384.
9. Nazmutdinov, F.F., Khabibullin, L.I. Mathematical modeling of gas desorption from a gas hydrate