

$$\vec{V}_{dr,k} = \vec{V}_k - \vec{V}_m \text{ Является скоростью дрейфа для вторичной фазой } \mathcal{L}$$

Список использованной литературы:

1. Мисбахов Р.Ш., Мизонов В.Е. Моделирование кинетики застывания жидкой капли при охлаждении. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2016.- №6 (76). – С. 72-74.
2. Москаленко Н.И., Мисбахов Р.Ш., Ермаков А.М., Гуреев В.М. Моделирование процессов теплообмена и гидродинамики в кожухотрубном теплообменном аппарате. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2014. - № 11-12. - С. 75-80.
3. Misbakhov R.Sh., Moskalenko N.I., Gureev V.M., Ermakov A.M. Heat transfer intensifiers efficiency research by numerical methods. // Life Science Journal. - 2015. - Т. 12. № 1S. - С. 9-14.

© Кувшинов Н.Е., Багаутдинов И.З., 2016

УДК 621.432.3

Н.Е. Кувшинов

инженер научно-исслед. лаборатории «ФХПЭ»

И.З. Багаутдинов

младший научный сотрудник научно-исслед. лаборатории госбюджетных НИР

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань, Российская Федерация

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДИАБАТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВСКИПАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Аннотация

В данной статье рассматривается критическое течение вскипающей жидкости в канале переменного сечения.

Ключевые слова

Гетерофазный поток, адиабатности процесса, дисперсный поток, жидкость-пар, паросодержания жидкости

На входе в канал жидкость всегда находится в капельном состоянии, т.е. процесс расширения начинается из однофазной области. При описании движения вскипающей жидкости в канале переменного сечения приняты следующие допущения.

Процесс расширения жидкости происходит без теплообмена с окружающей средой (адиабатный процесс).

Течение одномерное.

Фазовые переходы жидкость-пар начинаются в метастабильной области состояний.

Жидкая фаза в гетерофазном потоке находится в перегретом состоянии.

Паровая фаза в гетерофазном потоке находится в насыщенном состоянии.

Фазы движутся с одинаковыми скоростями.

Учитывается трение только жидкой фазы о стенку канала.

Обоснование допущений. Допущение об одномерности течения не оказывает существенного влияния на энергетические характеристики потока. Расчетные значения скорости, будут отличаться на 1-3 % от истинных в меньшую сторону на периферии потока и в большую - в центре струи. Основной недостаток одномерной схемы течения в том, что она не отражает структурной неоднородности гетерофазного потока.

Допущение об адиабатности процесса предполагает пренебрежение теплообменом потока с окружающей средой. Принимая во внимание то обстоятельство, что энтальпия жидкости намного больше того количества тепла, которое передается потоку через стенки канала за счет теплопроводности, допущение об адиабатности процесса не является грубым.

Допущение о зарождении паровой фазы в метастабильной области состояний соответствует теоретическим и экспериментальным сведениям об условиях фазовых переходов в реальных системах жидкость-пар.

Допущение о равенстве скоростей фаз в общем случае не соответствует действительности. Расхождение будет существенным в дисперсной области потока, где несущей средой является пар и по мере увеличения длины канала разность скоростей увеличивается. В литературе имеются сведения, что при пузырьковой структуре потока скорости фаз практически совпадают.

В дисперсном потоке жидкая фаза будет двигаться медленнее по сравнению с паровой фазой. Разность скоростей, обычно выражаемая коэффициентом скольжения $K = W_c/W$, зависит от градиентов давления и колеблется в диапазоне значений $K=1,2-1,8$. Пренебрежение скольжением фаз при массовых паросодержаниях жидкости $x < 0,9$ мало сказывается на точности расчетов параметров потока.

Уравнения сохранения. С учетом принятых допущений уравнения сохранения массы, количества движения и энергии примут вид:

$$\frac{1}{\varphi\rho_n + (1-\varphi)\rho_{жс}} \cdot \left[\varphi \frac{d\rho_n}{dz} + (\rho_n - \rho_{жс}) \frac{d\varphi}{dz} + (1-\varphi) \frac{d\rho_{жс}}{dz} \right] + \frac{1}{W} \frac{dW}{dz} + \frac{1}{F} \frac{dF}{dz} = 0$$

$$\varphi\rho_n W \frac{dW}{dz} + (1-\varphi)\rho_{жс} W \frac{dW}{dz} + \frac{dP}{dz} + \Phi_{\square p} = 0 \quad (1)$$

$$x \frac{di_n}{dz} + (i_n - i_c) \frac{d\varphi}{dz} + (1-x) \frac{di_c}{dz} + W \frac{dW}{dz} = 0$$

В системе уравнений (1) плотность и энтальпия двухфазной среды определяется на основании свойств аддитивности через паросодержание и параметры состояния фаз.

Сила трения жидкой фазы о стенку канала определяется согласно рекомендациям из уравнения:

$$\Phi_{TP} = \frac{c_f \rho_{жс} W^2}{2d}, \text{ где коэффициент трения равен: } c_f = \frac{1}{(0,812 \ln \text{Re} - 1,64)^2}.$$

Система уравнений (1) замкнута, если известны геометрия канала $F=F(z)$ и термодинамические свойства фаз, включая и метастабильную область состояний: $T=T_s(P)$, $\rho_n=\rho_n(T)$, $\rho_{жс}=\rho_{жс}(T)$, $i_n=i_n(T)$, $i_n^*=i(T^*)$, $L=L(T)$, $L^*=L(T^*)$, где *-параметры жидкости в метастабильной области состояний при перегреве $\Delta T=f(\pi)$, достижимом в процессе адиабатного расширения жидкости.

Для нахождения свойств фаз и коэффициентов аппроксимирующих функций удобно использовать пакет прикладных программ "Жидкость-пар", разработанный в лаборатории термодинамики кафедры ТОТ. Свойства фаз на линии насыщения определяются следующими однопараметрическими уравнениями.

Плотность жидкости:

$$\rho_c = \rho_{kp} [a_o \cdot (1 - \tau)^{a_1} + 1], \quad (2)$$

Плотность пара:

$$\rho_s = \left[\frac{P_s(T)}{RT_s} \right], \quad z = \left[\frac{P_{kp}}{RT_{kp}} \right] + a_o (1 - \tau) \quad (3)$$

Температура на линии насыщения:

$$T_s = T_{kp} \sum_{i=1}^5 a_i (1 - \ln \pi)^i, \quad (4)$$

Давление насыщенных паров:

$$P_s = P_{hp} \cdot \exp[a_0 + a_1(1/\tau) + a_2 \ln \tau + a_3 \tau], \quad (5)$$

Энтальпия насыщенных паров:

$$i_s = RT_{KP} (a_0 + a_1 \tau + a_2 \tau^2), \quad (6)$$

Скрытая теплота парообразования:

$$L = RT_{KP} a_0 (1 - \tau)^{a_1}, \quad (7)$$

Динамическая вязкость:

$$\eta = a_0 \cdot \exp\left(\frac{a_1}{\tau}\right). \quad (8)$$

Поверхностное натяжение:

$$\sigma = \sigma_0 a_0 (1 - \tau)^{a_1}, \quad \sigma_0 = \left(\rho_{KP}^{1/3} \cdot \mu^{1/3} \cdot RT_{KP}\right) / Na^{1/3}, \quad (9)$$

В уравнениях (2-9): N_A - число Авогадро, μ - молекулярный вес, $(\rho_{KP}, P_{KP}, T_{KP})$ - параметры вещества в критической точке.

Численное интегрирование системы уравнений. Разрешим систему уравнений (1) относительно производных по давлению, скорости и паросодержанию, предварительно выполнив операции дифференцирования. Принимая во внимание уравнение связи между массовым и объемным паросодержанием. $x = \varphi \rho_n / \rho_{ж}$ и выражая энтальпию жидкости через энтальпию пара и скрытую теплоту парообразования $i = (i_s - L)$, систему уравнений сохранения приведем к виду:

$$\begin{aligned} U_{11} \frac{dP}{dz} + \frac{1}{W} \frac{dW}{dz} + U_{13} \frac{d\varphi}{dz} &= U_{14}, \\ \frac{dP}{dz} + \rho W \frac{dW}{dz} &= -\Phi, \\ U_{31} \frac{dP}{dz} + W \frac{dW}{dz} + U_{33} \frac{d\varphi}{dz} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где для краткости записи введены обозначения:

$$Y_0 = x = \varphi \rho_n / \rho, \quad (11)$$

$$Y_1 = \varphi \frac{d\rho_n}{dP} + (1 - \varphi) \frac{d\rho_c}{dP}, \quad (12)$$

$$Y_2 = \frac{d\rho_n}{dP} \frac{\varphi}{\rho} - \frac{\varphi \rho_n}{\rho^2} \cdot Y_1, \quad (13)$$

$$U_{11} = Y_1 / \rho, \quad (14)$$

$$U_{13} = (\rho_n - \rho_c) / \rho, \quad (15)$$

$$U_{14} = -\frac{1}{F} \frac{dF}{dz}, \quad (16)$$

$$U_{31} = Y_2 i_s + Y_0 \frac{di_s}{dP} + (1 - Y_0) \left(\frac{di_s}{dP} - \frac{dL}{dP} \right) - Y(i_{*s} - L_{*s}), \quad (17)$$

$$U_{33} = Y_3 (i_s - i_{*s} + L_{*s}). \quad (18)$$

Алгоритм расчета должен включать условие критического течения, при котором расход стремится к критическому, $G \rightarrow G_{кр}$ и градиент давления по всему тракту канала имеет отрицательное значение, $\frac{dP}{dz} < 0$.

Метод решения. Численное интегрирование системы линейных дифференциальных уравнений осуществлялось методом Рунге-Кутты. Алгоритм расчета включает условие критического течения, при котором расход $G \rightarrow G_{кр}$ и градиент давления по всему тракту канала имеет отрицательное значение $\frac{dP}{dz} < 0$.

Метод решения - "пристрелка по расходу". Для этого при заданных начальных параметрах потока p_0 и T_0 задается максимально возможный расход $G_{max} = F_c [2\rho_c m_0]^{0.5}$ и минимально возможный расход $G_{min} = 0$.

Критический расход подбирается в интервале $G_{min} < G_{кр} < G_{max}$ до выполнения условия $\frac{dP}{dz} < 0$. При найденном значении критического расхода вычисляются параметры потока в тракте сопла. Для вычисления критического расхода требуется 10-16 приближений. Блок-схема, алгоритм решения и распечатка программы приведена в Приложении. Копия программного продукта на магнитном носителе прилагается к отчету.

Список использованной литературы:

1. Тукмаков А.Л., Мубаракшин Б.Р., Тонконог В.Г. Моделирование процесса одоризации природного газа. // Инженерно-физический журнал. - 2016. - Т. 89. - № 1. - С. 127-132.
2. Tukmakov A.L., Tonkonog V.G., Arslanova S.N. Effect of the coagulation rate on the settling time of stationary vibrations of aerosol in an acoustic resonator. // Physics of Wave Phenomena. - 2015. - Т. 23. - № 3. - С. 235-240.
3. Карелин Д.Л., Гуреев В.М., Мулюкин В.Л. Моделирование систем охлаждения с парожидкостной компрессионной установкой. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. - 2015. - Т. 71. - № 5. - С. 5-10.
4. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Гуреев В.М., Мисбахов Р.Ш. Оценка технического уровня сложных систем на этапе разработки. Вестник машиностроения. - 2015. - № 6. - С. 35-39.
5. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Исхаков А.Р. Эффективность сепарирующих контактных устройств в демистерах. // Газовая промышленность. - 2015. - № 11 (730). - С. 92-94.
6. Лаптева Е.А., Шагиева Г.К., Лаптев А.Г. Эффективность насадочных декарбонизаторов в водоподготовке ТЭС. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2015. - № 11-12. - С. 20-25.
7. Мисбахов Р.Ш., Мизонов В.Е. Моделирование кинетики застывания жидкой капли при охлаждении. // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. - 2015. - № 6 (76). - С. 72-74.

© Кувшинов Н.Е., Багаутдинов И.З., 2016

УДК 621.432.3

Н.Е. Кувшинов

инженер научно-исслед. лаборатории «ФХПЭ»

М.М. Салимханов

магистр 2 курса гр. ТПЭМ-1-15

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань, Российская Федерация

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Аннотация

В данной статье проводились расчеты параметров двухфазного потока, образующегося в процессе адиабатного истечения капельной жидкости через сопла Лавалья.