

Р. Р. Калимуллин, А. В. Свистунов, Р. Ф. Хакимов

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ВИХРЕВЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАХ

Выполнен анализ экспериментальных исследований процессов течения многофазной жидкости по замкнутому контуру вихревого теплогенератора. Произведен вывод уравнения состояния рабочего тела при экзотермических вихревых процессах. *Вихревой теплогенератор; вихревой эффект; газовая фаза; закрученные потоки*

При организации вихревого течения различными методами (тангенциальный или винтовой ввод, изменение геометрии вихревых каналов по количеству и направлениям сопловых вводов и т. д.) начинают проявляться явления, совершенно не соответствующие закономерностям классических одномерных течений. Особенности этих явлений в ряде случаев могут использоваться для повышения энергоэффективности различных технологических процессов.

Оптимизация этих процессов в значительной степени определяется уровнем математического обеспечения на этапах расчетно-проектных и доводочных работ. Численное моделирование, широко применяемое в настоящее время для исследования течения жидкости в трехмерном представлении, несмотря на высокую точность и достаточное количество прикладных пакетов, не обеспечивает решение задач в нестационарной постановке.

Именно необходимость нестационарного подхода к решению задач вихревых течений вынуждает изыскивать новые методы решений, включая ранее известные методы одномерных решений с введением эмпирических зависимостей, идентифицированных по результатам экспериментальных испытаний.

При проведении исследований в области термогидродинамики течения жидкостей в большинстве случаев принимается допущение о несжимаемости жидкости [1]. Оно заключается в том, что плотность жидкости считается постоянной по всему объему с течением времени. Это допущение существенно облегчает математическое моделирование термодинамических процессов течения жидкости тем, что уравнение неразрывности принимает простой вид

$$\operatorname{div} \bar{v} = 0,$$

где \bar{v} – вектор скорости жидкости.

Кроме этого, допущение о несжимаемости автоматически приводит к однофазной постановке задачи, что уменьшает размерность системы, так же облегчая ее решение.

При решении задач течения закрученных потоков в большинстве случаев также используют допущение о несжимаемости. Вместе с тем, отличительная особенность течения жидкости по закрученной траектории состоит в том, что процесс носит экзотермический характер, проявляющийся в повышении температуры жидкости вплоть до температуры кипения при данном давлении, при течения жидкости по замкнутому контуру.

Рассматривая процесс нагрева жидкости в замкнутом контуре постоянного объема (контур вихревого теплогенератора), можно наблюдать повышение давления рабочей среды [2], объясняющегося тепловым расширением жидкости. Но, если жидкость несжимаема, то при изменении давления должен изменяться объем, занимаемый жидкостью, что противоречит реальным условиям замкнутого контура (объем постоянен). Таким образом, появляется расхождение в трактовке процесса с реальным процессом при допущении несжимаемости жидкости.

Для устранения противоречия необходимо изменить допущение о несжимаемости.

В жидкости всегда присутствует некоторое количество растворенного воздуха, определяемое законом Генри

$$V_{\Gamma} = k \cdot V_{\text{см}} \cdot \frac{p}{p_{\text{атм}}}, \quad (1)$$

где V_{Γ} – объем растворенного газа в жидкости; k – коэффициент растворимости (коэффициент Генри); $V_{\text{см}}$ – объем жидкости, в которой присутствует растворенный воздух; p – давление в жидкости; $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление.

Таким образом, можно считать рабочую среду – жидкость – многофазной изначально (при нормальных условиях), состоящей из жидкой фазы и газовой фазы (растворенный воздух). Дополнительно, при нагреве жидкости происходит изменение агрегатного состояния жидкой фазы – переход от жидкого состояния в газообразное, проявляющееся в выделении водяного пара в результате испарения жидкости. Жидкость, таким образом, представляет собой трехкомпонентную смесь, включающую собственно жидкость (воду), растворенный в ней при данной температуре и давлении воздух и водяной пар, выделившийся при нагреве жидкости. В первом приближении можно считать жидкость двухкомпонентной – состоящей из жидкой фазы и газообразной фазы, включающей растворенный воздух и водяной пар.

В работе [3] рассматривается процесс влияния растворенного газа на процессы в жидкой смеси при изменении ее температуры. Проанализировав выведенные в работе соотношения, можно представить зависимость изменения объема газовой фракции от давления и температуры при допущении, что скорость изменения температуры рабочей среды позволяет установиться газовому равновесию. Под газовым равновесием понимается соответствие объема растворенного в жидкости воздуха при данном давлении и температуре, вычисляемому по закону Генри (1). Объем газовой фракции, таким образом, изменяется по зависимости

$$V_2 = \frac{kV_{cm}(pT_0(\beta_T T - \beta_T T_0 - 1) - p_0 T)}{pT_0(1 + \beta_T T - \beta_T T_0) - p_0 T}, \quad (2)$$

где p_0 – начальное давление в системе; T_0 – начальная температура системы; T – конечная температура системы; β_T – термический коэффициент объемного расширения жидкости.

Рассмотрим процесс нагрева рабочей жидкости в замкнутом контуре вихревого теплогенератора.

Начальными условиями выбраны следующие параметры: начальное давление системы равно статическому подпору, необходимому для запуска насоса; начальная температура жидкости равна температуре окружающей среды, количество растворенного воздуха в жидкости согласуется с законом Генри при данной температуре; расход жидкости равен нулю.

При запуске насоса в замкнутом объеме происходит увеличение давления и температуры (рис. 1) – здесь и далее представлены результаты эксперимента, описанного в [2].

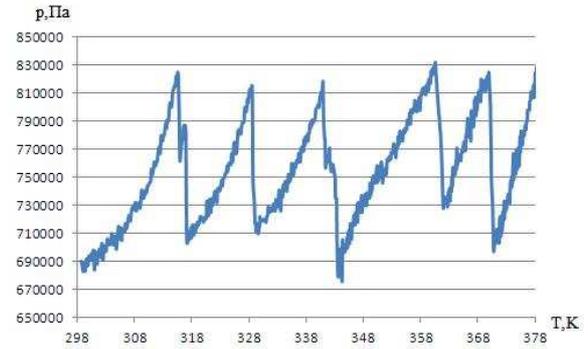


Рис. 1. Экспериментальная зависимость приращения давления от приращения температуры

Увеличение давления способствует объемному сжатию жидкости, а увеличение температуры способствует температурному расширению жидкости. В случае несжимаемой жидкости приращение давления имеет вид

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \beta_p}, \quad (3)$$

где $\Delta V = V - V_0$ – изменение объема среды; V_0 – начальный объем системы; $V = V_0(1 + \beta_T \Delta T)$ из условия температурного расширения; β_T – термический коэффициент объемного расширения [4]; ΔT – перепад температур; β_p – коэффициент объемного сжатия.

Согласно [5], коэффициент объемного сжатия для воды при давлении до 50 МПа практически постоянен и равен $4,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}$.

При подстановке вышеописанных выражений в уравнение (3), получается зависимость приращения давления от приращения температуры:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{V - V_0}{V_0 \beta_p} = \frac{V_0(1 + \beta_T \Delta T) - V_0}{V_0 \beta_p} = \\ &= \frac{V_0(1 + \beta_T T - 1)}{V_0 \beta_p} = \frac{\beta_T \Delta T}{\beta_p}. \end{aligned} \quad (4)$$

Представив выражение (4) в абсолютных значениях, получается зависимость давления от температуры, которую можно сравнивать с экспериментальной зависимостью:

$$p = \frac{\beta_T (T - T_0)}{\beta_p} + p_0. \quad (5)$$

При увеличении температуры на $16,82 \text{ }^\circ\text{C}$ давление в эксперименте увеличилось на $1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (рис. 1), а по расчетам (5) давление должно было измениться на $8 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Значит, присутствие растворенного воздуха в системе вносит определенный вклад в термодинамику

процесса. По выражению (2) изменение объема газовой фракции при подстановке экспериментальных данных за время до первого стравливания составило 281 мл, что соответствует количеству растворенного воздуха в системе при начальных условиях (по выражению (1)). Таким образом, допущение о соответствии объема газа при начальных условиях является обоснованным.

Для идентификации оценки влияния объема газовой фракции на значение давления в системе был проведен эксперимент, описанный в [2], с дополнительным измерением объема выделившегося рабочего тела из системы путем стравливания части рабочего тела.

Процесс стравливания заключается в выпуске части рабочего тела из контура в специальную систему измерения объема выделившегося тела, представленную на рис. 2.

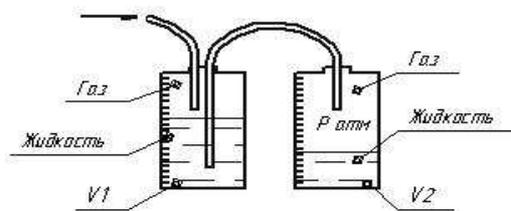


Рис. 2. Система измерения количества выделившегося рабочего тела из системы

Необходимо отметить, что стравливание обусловлено соображениями безопасности, так как давление достигает критического для насоса значения, что может привести к выходу из строя механических частей насоса.

При стравливании из системы выделяется водяной пар, растворенный воздух и жидкость. Для упрощения принимается, что выделяется газообразная среда и жидкая. При этом давление падает до некоторого значения (давление закрытия клапана стравливания – 0,7 Мпа при первом выпуске). Объем газообразной фракции, выделившейся из системы, может быть определен следующим образом:

$$V_r = \mu F \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_r}} t. \quad (6)$$

Общее количество выделившегося рабочего тела может быть определено как экспериментальным, так и расчетным путем.

В результате эксперимента объем выделившегося рабочего тела составил 281 мл, это свидетельствует о том, что выделялась газообразная фракция. Таким образом, можно принять,

что объем газа, рассчитанный по формуле (2), позволил при данной температуре установиться давлению, полученному в эксперименте.

Тогда после стравливания дальнейший рост давления низкими темпами относительно темпов расчетных обусловлен выделением газовой фракции, объем которой можно рассчитать по выражению (2).

Показатель количества газовой фракции может быть получен из соотношения

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^n, \quad (7)$$

где n – показатель количества газа в системе:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{p}{p_0}\right)}{\ln\left(\frac{T}{T_0}\right)}. \quad (8)$$

Он определяет степень выделения газовой фракции при нагреве жидкости в замкнутом контуре.

Принимая линейную зависимость объема газовой фракции от показателя количества газа, можно вывести отношение объема газа в системе от показателя количества газа. Прямая строится по двум точкам: по уравнению (5) в случае однофазной среды, показатель равен 53 (8), а объем газа равен нулю; по эксперименту и выражению (2) показатель равен 3,4; объем газа равен 281 мл. Уравнение прямой выглядит следующим образом:

$$V_g = -0,0056n + 0,298. \quad (9)$$

Для оценки объема газа, выделившегося перед каждым стравливанием, сначала считается показатель количества газа по формуле (8), затем по формуле (2) или (9) находится объем газовой фракции.

Суммарный объем газовой фракции, выделившийся из замкнутого контура за время до нагрева рабочей жидкости до температуры кипения при данном давлении, составил по эксперименту, 1400 мл, а по расчетам 1375 мл, что не превышает 5 % погрешности. Погрешность обусловлена выбором линейной зависимости объема газа от показателя количества газа, но вследствие работы в области малых значений показателя количества газа ($n = 3 \dots 8$), такие величины объемов газовой фракции оправданы приемлемой погрешностью.

Приведенные выше расчеты позволяют составить уравнение состояния многофазной жид-

кости при ее вихревом движении по замкнутому контуру.

Плотность смеси жидкой и газообразной фаз можно принять равной сумме плотностей каждой фазы с учетом их концентраций при данных условиях:

$$\rho = \rho_{\text{ж}} n_{\text{ж}} + \rho_{\text{г}} n_{\text{г}}, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы (принимается эквивалентной плотности воды); $n_{\text{ж}} = \frac{V_{\text{ж}}}{V}$ – концентрация жидкой фазы, $V_{\text{ж}}$ – объем, занимаемый жидкой фазой, V – объем системы; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газообразной фазы; $n_{\text{г}} = \frac{V_{\text{г}}}{V}$ – концентрация газообразной фазы, $V_{\text{г}}$ – объем газовой фазы.

Принимая допущение, что в системе отсутствует свободный воздух, объем жидкой фазы можно вычислить, решив уравнение закона Генри при условии $V = V_{\text{ж}} + V_{\text{г}}$:

$$V_{\text{ж}} = V \left(1 - \frac{kp}{p_0} \right). \quad (11)$$

Плотность смеси с учетом концентраций и объемов каждой из фаз можно записать как

$$\rho = \rho_{\text{ж}} \left(1 - \frac{kp}{p_0} \right) + \rho_{\text{г}} \frac{V_{\text{г}}}{V}. \quad (12)$$

Если рассматривать функциональный вид уравнения (12), то получится уравнение состояния:

$$\rho(p, T) = \rho_{\text{ж}}(T) \left(1 - \frac{k(T)p}{p_0} \right) + \rho_{\text{г}}(T) \frac{V_{\text{г}}(p, T)}{V}. \quad (13)$$

В результате составлена концептуальная модель процесса нагрева рабочего тела при движении по закрученной траектории в замкнутом контуре. На основании принятых допущений составлено идентифицированное уравнение состояния рабочего тела (13), позволяющее учитывать влияние газообразной фазы на экзотер-

мические процессы в закрученных потоках жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учебник. М.: Наука, 1987. 840 с.
2. Ахметов Ю. М., Калимуллин Р. Р., Целищев В. А. Численное и физическое моделирование течения жидкости в вихревом теплогенераторе // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 4(39). С. 42–49.
3. Дарьян Л. А. Исследование механизма повреждения внутренней изоляции трансформаторов тока с «газовой подушкой» // Электрические станции. 2008. № 5. С. 42–49.
4. Теплотехнический справочник / Под общ. ред. В. Н. Юрнева и П. Д. Лебедева. М.: Энергия, 1976. 896 с.
5. Лашутина Н. Г. Техническая термодинамика с основами теплопередачи и гидравлики: Учеб. пособие / Под общ. ред. Р. М. Медведева. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 336 с.
6. Ресурсосберегающие технологии подогрева производственных помещений на основе вихревого теплогенератора / Ю. М. Ахметов [и др.] // Тр. IX международ. науч.-техн. конф. Ростов-На-Дону, 2010. С. 52–61.

ОБ АВТОРАХ

Калимуллин Радик Рифкатович, асс. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. инженер техники и технологии по энергомашиностроению (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. высоконапорн. многофазн. течения жидкости.

Свистунов Антон Вячеславович, мл. науч. сотр. той же каф. Дипл. магистр гидр., вакуум. и компресс. техн. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

Хакимов Рустем Фанилевич, асп. той же каф. Дипл. магистр гидр., вакуум. и компресс. техн. (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. высоконапорн. многофазн. течения жидкости.