

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ СБРОСА В ПРЕДКЛАПАНЕ

Долинина Ю.Я., ООО «НТП Трубопровод»

На страницах журнала ТПА уже рассказывалось о программе «Предклапан», применяемую для проектирования систем аварийного сброса [1–3]. В настоящее время идет подготовка к выпуску новой версии программы, возможностям которой посвящена данная статья.

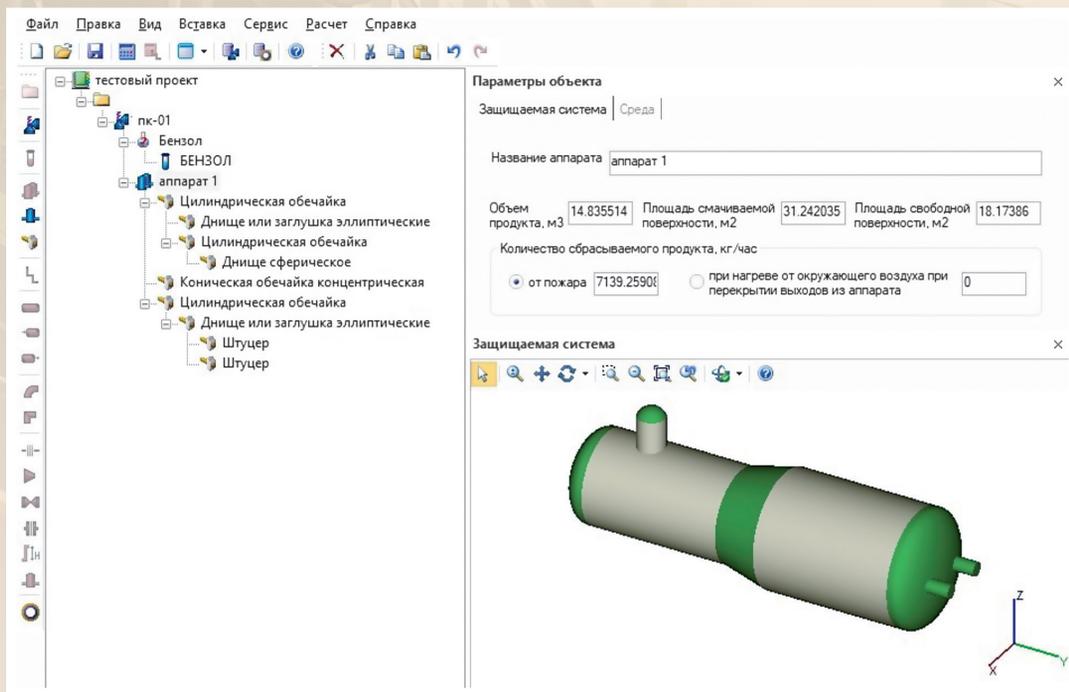


Рисунок 1 – Конструктор защищаемой системы

Конструктор защищаемой системы

Одним из нововведений является «Конструктор защищаемой системы» – инструмент визуализации аппаратов, для которых производится расчет системы сброса. Этот инструмент позволит проектировщику построить защищаемый аппарат

конкретной формы, а также рассчитать объем, занимаемый продуктом, и площади смоченной и свободной поверхностей (рис. 1). Внешний вид и принцип работы окна конструктора во многом напоминает «Конструктор оборудования» в «Изоляции» [4]. Выводы формул объемов и площадей для некоторых конструктивных элементов можно найти в опубликованных ранее статьях [5–8].

Возможные аварийные сценарии

При проектировании систем сброса тщательно анализируются возможные причины повышения давления в защищаемой системе. Для каждого аварийного сценария выполняются расчеты необходимой пропускной способности системы сброса [9]. В новой версии «Предклапана» впервые появится расчет количества сбросов для двух наиболее часто встречающихся аварийных ситуаций: в условиях пожара и при нагреве от окружающего воздуха с одновременным перекрытием выходов из аппарата. В дальнейших версиях предполагается существенно расширить спектр рассчитываемых аварийных

ситуаций с учетом специфики защищаемого оборудования или трубопровода.

В сравнительно простых случаях нарушения теплового баланса однокомпонентных жидкости или газа расчет сводится к оценке притока тепла в единицу времени и порождаемого им вскипания или увеличения объема продукта. В случаях вскипания многокомпонентных жидкостей может требоваться учет изменения состава и температуры продукта и, следовательно, динамического моделирования этого процесса или другие приближенные методы расчета.

Расчет количества сбросов для однокомпонентных продуктов

Важными параметрами аппарата при расчете количества сбросов от нагрева извне являются: площадь поверхности $F, м^2$, и коэффициент теплопередачи k (зависит от наличия огнестойкой изоляции), $Вт / (м^2 \cdot К)$.

При пожаре для аппаратов, полностью заполненных жидкой фазой, и аппаратов, содержащих жидкую и паровую фазу, количество сбросов определяется по формуле:

$$G_{п.к.} = (F \cdot k \cdot (t_z - t_{ж.})) / r, кг / с, \quad (1)$$

где t_z и $t_{ж.}$ – температура газовой смеси на поверхности аппарата и температура кипения жидкости при давлении P_1 (полного открытия предохранительного клапана), °С; $t_z = 600^\circ\text{C}$; r – скрытая теплота испарения жидкости при давлении P_1 , Дж/кг.

Для аппаратов, содержащих паровую фазу, в условиях пожара количество сбросов через предохранительный клапан

определяется по формуле:

$$G_{п.к.} = (F \cdot k \cdot (t_z - t_n)) / (C_p \cdot (t_n + 273)), \quad (2)$$

где t_z и t_n – температура газовой смеси на поверхности аппарата и температура газов в аппарате при нормальном режиме, °С; $t_z = 600^\circ\text{C}$; C_p – теплоемкость газа при давлении P_1 , Дж / (кг·К).

Расчет количества сбросов при нагреве от окружающего воздуха и перекрытии выходов из аппарата производится по формуле:

$$G_{п.к.} = (\beta F \cdot k \cdot (t_{возд.} - t)) / C_p \quad (3)$$

где β – коэффициент объемного расширения, $1 / (^\circ\text{C})$; $t_{возд.}$ и t – температура окружающего воздуха и температура продукта, °С; C_p – удельная теплоемкость, Дж / (кг · °С).

Расчет количества сбросов для многокомпонентных жидкостей

По мере выкипания многокомпонентной жидкости могут изменяться состав и температура продукта, поэтому применение формул (1) и (3) напрямую некорректно, для этого существуют приближенные методы расчета. Для оценки сверху количества сбросов можно поочередно выполнить расчет для каждого отдельного компонента, содержащегося в жидком продукте, как будто весь аппарат заполнен только одним этим компонентом. А затем выбрать наибольшее из полученных значений, таким образом определяется максимально возможное количество сбросов, с запасом.

Для более точного расчета в программе используется метод моделирования процесса выкипания жидкости и сброса паров через предохранительный клапан путем серии расчетов однократного испарения. Последовательность шагов следующая:

1. В начале алгоритма, на шаге $k = 0$, определяются следующие параметры жидкой и паровой фаз: массовый состав ($x_{ж.}^0, x_{п.}^0$), начальные массы ($M_{ж.}^0, M_{п.}^0$) плотности ($\gamma_{ж.}^0, \gamma_{п.}^0$) и удельные энтальпии ($i_{ж.}^0, i_{п.}^0$) при давлении полного открытия клапана P_1 и температуре начала кипения жидкости t^0 .

2. Затем выполняется расчет однократного испарения массовой доли жидкости – δ . Таким образом, после испарения масса жидкой и газовой фаз составит $M_{ж.}^{k+1} = (1 - \delta) M_{ж.}^k$ и $M_{п.}^{k+1} = M_{п.}^k + \delta M_{ж.}^k$ соответственно. Определяются новые значения плотности $\gamma_{ж.}^{k+1}, \gamma_{п.}^{k+1}$ и теплосодержания $i_{ж.}^{k+1}, i_{п.}^{k+1}$ фаз, а также температура t^{k+1} после испарения.

3. Далее необходимо рассчитать тепловой поток Q^k от нагрева, например, в случае пожара используется числитель в формуле (1), а в качестве параметров применяются средние арифметические значения на шаге k и $k + 1$. Зная величину

теплового потока, можно определить время однократного испарения доли жидкой фазы из уравнения теплового баланса: $\tau^k = [M_{ж.}^{k+1} \cdot i_{ж.}^{k+1} + M_{п.}^{k+1} \cdot i_{п.}^{k+1} - M_{ж.}^k \cdot i_{ж.}^k - M_{п.}^k \cdot i_{п.}^k] / Q^k$.

4. Затем выполняется расчет объема $V_{п.к.}^k = M_{п.к.}^{k+1} / \gamma_{п.к.}^{k+1} + M_{п.к.}^{k+1} / \gamma_{п.к.}^{k+1} - V$ и массы $M_{п.к.}^k = V_{п.к.}^k \cdot \gamma_{п.к.}^{k+1}$ газовой фазы, подлежащей сбросу через предохранительный клапан, учитывая неизменный объем аппарата V . Итого, искомый расход через клапан на шаге k равен $G_{п.к.}^k = M_{п.к.}^k / \tau^k$.

5. Перед расчетом следующего однократного испарения необходимо скорректировать массу газовой фазы, уменьшив ее на величину сброшенной через клапан: $M_{п.к.}^k = M_{п.к.}^k - \delta M_{п.к.}^k$.

6. Также требуется определить состав оставшегося в аппарате продукта, который изменился из-за сброса. На каждой итерации при расчете фазовых равновесий рассчитываются составы жидкой и газовой фаз ($x_{ж.}^k, x_{п.}^k$), откуда можно получить массу каждого компонента $M_{ж.}^k = x_{ж.}^k \cdot M_{ж.}^k, M_{п.}^k = x_{п.}^k \cdot M_{п.}^k$. После испарения массовой доли жидкости δ массы каждого компонента в жидкой и газовой фазах составят $M_{ж.}^{k+1} = x_{ж.}^{k+1} \cdot M_{ж.}^{k+1}, M_{п.}^{k+1} = x_{п.}^{k+1} \cdot M_{п.}^{k+1}$ (где $M_{п.}^{k+1}$ уже учитывает сброшенную через клапан массу газовой фазы согласно п. 5). Массовая доля компонента в составе оставшегося в аппарате продукта составит $x_{ж.}^{k+1} = (M_{ж.}^{k+1} + M_{п.}^{k+1}) / (M_{ж.}^{k+1} + M_{п.}^{k+1})$, а доля отгона $X = M_{п.}^{k+1} / (M_{ж.}^{k+1} + M_{п.}^{k+1})$.

Итерации продолжаются до тех пор, пока не выкипит более 90 % жидкой фазы, либо когда эффективная площадь клапана станет вдвое меньше значения на первом шаге.

Москва, февраль 2025 года

Список литературы:

1. Корельштейн Л. Б., Юдовина Е. Ф. Новая версия программы «Предклапан» // ТПА. – 2021. – № 4 (115). – С. 39.
2. Корельштейн Л. Б. Новый ГОСТ 12.2.085-2017 и новая версия программы «Предклапан» // ТПА. – 2018. – № 6 (99) – С. 32–33.
3. Лисин С. Ю., Корельштейн Л. Б. «Предклапан»: программа проектирования систем аварийного сброса // ТПА. – 2013. – № 1 (64) – С. 74–77.
4. Долгина, Ю. Я., Юдовина Е. Ф. Конструктор оборудования для «Изоляции» 2.54 // ТПА. – 2024. – № 5 (134). – С. 32–33.
5. Корельштейн, Л. Б. Расчет площади поверхности эксцентрических конических обечеек и переходов // ТПА. – 2024. – № 6 (135). – С. 54–55.
6. Корельштейн Л. Б. Формула расчета смачиваемой поверхности эллиптического днища // ТПА. – 2018. – № 1 (94). – С. 64–65.
7. Корельштейн Л. Б. Расчет смачиваемой поверхности выпуклых и тороидальных днищ горизонтальных аппаратов // ТПА. – 2018. – № 2 (95). – С. 82.
8. Корельштейн Л. Б. Еще раз о расчете смачиваемой поверхности выпуклых днищ горизонтальных аппаратов // ТПА. – 2019. – № 2 (101). – С. 62.
9. Болдыжев А. В., Иткина Д. М., Корельштейн Л. Б. Системы аварийного сброса и сценарии аварийных ситуаций // ТПА. – 2015. – № 5 (80). – С. 83–84.