

СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО СБРОСА И СЦЕНАРИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Болдыжев А. В., Иткина Д. М., Корельштейн Л. Б.
(ООО «НТП Трубопровод»), Москва

Каждый специалист по проектированию технологических процессов, проектированию и эксплуатации предохранительной арматуры непременно обращается к основополагающему межгосударственному стандарту ГОСТ 12.2.085-2002 «Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности». Те, кто имеет дело с паром и горячей водой, пользуются также ГОСТ 24570-81 «Клапаны предохранительные паровых и водогрейных котлов. Технические требования».

В недавнем прошлом эти два стандарта существенно дополнялись Правилами безопасности (ПБ) Ростехнадзора. Кроме того, различные инженерные организации разрабатывали собственные документы и стандарты, вобравшие требования и рекомендации, учитывающие конкретные отраслевые проблемы. Например, в группе компаний ООО «НТП Трубопровод» и АО «ИПН» действует стандарт организации СТО ИПН/НТП 12-01-2010 «Правила расчета и проектирования систем аварийного сброса», являющийся переработкой документа У-ТБ-06-85 «Указания по выбору, расчету и установке предохранительных клапанов», разработанного ВНИПИнефть.

В стандарте организации: проработан вопрос о месте установки ПК в зависимости от соотношения давлений в аппарате и питающем источнике; даются специальные рекомендации по установке ПК на аппаратах колонного типа, теплообменниках, насосах и компрессорах; описываются условия, при которых установка ПК необязательна или нежелательна.

Повторяя основные положения межгосударственного стандарта об ограничениях, налагаемых токсичностью, пожаро- и взрывоопасностью обрабатываемой в процессе среды, СТО ИПН/НТП 12-01-2010 выдвигает целый ряд дополнительных требований, облегчающих проектировщику задачу соблюдения условий безопасной эксплуатации при размещении ПК в сложной технологической схеме.

При этом первым, базовым вопросом при проектировании любой системы аварийного сброса является определение перечня возможных сценариев ситуаций, приводящих к аварийному повышению давления. Далее для каждого из возможных сценариев проводится расчет технологических параметров (давления, температуры, состава, агрегатного состояния) и

необходимого количества сбрасываемого продукта (т. е. фактически требуемой пропускной способности системы сброса). Именно этому вопросу посвящен основной объем стандарта СТО ИПН/НТП 12-01-2010 (50 страниц из 60).

В практике разработки и применения промышленного оборудования встречается множество причин, вызывающих аварийное повышение давления. В литературе предлагаются различные способы их систематизации, но чаще всего они носят сугубо «эмпирический» характер, основанный на традициях.

На наш взгляд, для целей проектирования и расчета систем аварийного сброса более продуктивно классифицировать сценарии аварийных ситуаций прежде всего по физическому механизму, вызывающему аварийное повышение давления. В этом случае сценарии можно классифицировать следующим образом:

- нарушение материального баланса системы, приводящее к накоплению продукта в ограниченном объеме и, как следствие, аварийному повышению давления;
- нарушение теплового баланса системы (возможно, совмещенное с нарушением материального баланса). Причинами роста давления в этом случае являются вскипание продукта в защищаемой системе и/или его тепловое расширение в ограниченном объеме.

Нарушение материального баланса подразумевает классическое несоблюдение тождественности сумм расходов рабочих сред на входе и выходе защищаемой системы. Причинами этого могут быть:

- аварийное закрытие выхода (например, вследствие неисправности арматуры, системы управления или ошибки оператора);
- открытие или резкое увеличение входного потока (например, из-за отказа регулирующей или дроссельной арматуры, или ошибки оператора);
- возникновение «нештатного» входного потока из-за нарушения целостности контуров защищаемой системы (например, при разрыве трубки кожухотрубчатого теплообменника, с истечением среды из пространства высокого давления в пространство низкого давления).

Сценарии с нарушением только материального баланса, как правило, наиболее просты для расчета — достаточно оценить возможную разность объемных расходов на входе и выходе защищаемой системы при параметрах сброса. Сложность может представлять расчет аварийных потоков на входе в систему вследствие разрушения целостности либо через арматуру (запорную,

регулирующую, дроссельную), работающую в нерасчетном режиме, в особенности для случая с критическим истечением газообразного продукта или двухфазной смеси. Также дополнительным осложняющим фактором может служить наличие нескольких фаз в защищаемой системе или изменение состава продукта в аппарате в процессе развития аварийного сценария.

Сценарии нарушения материального баланса характерны для абсолютного большинства трубопроводов, оборудования и машин, работающих под давлением.

Нарушение теплового баланса включает в себя процессы, приводящие к превышению тепловой нагрузки, расходованию в тепловых потоках на входе и выходе системы в пользу теплового потока на входе. Такие сценарии характерны для оборудования с непосредственным подогревом, например, для колонных или теплообменных аппаратов, а также емкостей с наружным или внутренним обогревом, — например, при остановке перекачки обогреваемого продукта и особенно при одновременном закрытии входов и выходов защищаемой системы. Также такие сценарии возможны для систем, в состав которых входят аппараты с наружным охлаждением (например, аппараты воздушного охлаждения), когда по тем или иным причинам система охлаждения прекращает работать.

Другой причиной, приводящей к нарушению теплового баланса, может быть возникновение аварийного внешнего теплового потока. Наиболее типичный случай — пожар (это один из самых частых и типичных сценариев расчета для аппаратов самого разнообразного вида), однако возможны и более экзотические сценарии — тепловой поток от нерасчетного режима работы факельной системы, солнечная радиация и т. п. Возможен и аварийный тепловой приток (вместе с массовым притоком) вследствие нарушения целостности защищаемой системы (например, тот же случай разрушения трубки кожухотрубчатого теплообменника).

Наконец, для химических производств характерны аварийные ситуации с возникновением источников тепла внутри аппарата, а именно — вышедшие из-под контроля экзотермические химические реакции. В этом

случае в дополнение к нарушению теплового баланса добавляется еще и нарушение материального баланса из-за самой химической реакции.

По степени сложности расчета сценарии аварийных ситуаций с нарушением теплового баланса могут варьироваться в очень широких пределах. В сравнительно простых случаях теплового расширения жидкости или газа в аппарате или поверхностного вскипания однокомпонентной жидкости расчет сводится к оценке притока тепла в единицу времени и порождаемого им увеличения объема продукта в аппарате из-за теплового расширения (расчет с использованием коэффициента объемного расширения) или вскипания (расчет с использованием скрытой теплоты испарения). Сценарии поверхностного вскипания многокомпонентных жидкостей (особенно широкого состава) могут требовать учета изменения состава продукта в аппарате по мере его выкипания и, следовательно, динамического моделирования этого процесса в том или ином виде. Случай объемного вскипания (кипение пенистых жидкостей, а также кипение жидкостей в системах с малым расстоянием между стенками — например, в обогревающих рубашках) требует учета двухфазного характера самого сброса (в этом случае на сброс вместе с паровой фазой будет поступать и жидкая), для него разработана специальная расчетная методология DIERS (Design Institute for Emergency Relief Systems of The American Institute of Chemical Engineers, ООО «НТП Трубопровод» входит в группу пользователей DIERS с 2009 года). Наиболее сложен расчет систем с экзотермическими химическими реакциями, так как для них к объемному кипению добавляется еще и необходимость расчета самих реакций и выделяемого ими тепла (методы расчета таких аварийных ситуаций также исследованы и разработаны DIERS).

Расчет аварийных ситуаций для колонных аппаратов (где сочетаются тепловой и массовый дисбалансы), по сути, требует динамического моделирования. Однако для наиболее типичных аварийных ситуаций часто применяется приближенный метод расчета (так называемый метод несбалансированной тепловой нагрузки).

Расчет кожухотрубчатых теплообменников при разрыве трубки и ис-

течении теплоносителя представляет собой один из самых «коварных» сценариев аварийной ситуации, когда в зависимости от состава и параметров обрабатываемых сред может потребоваться учитывать разнообразные факторы: вскипание как одного, так и другого продукта, их смешение, изменение состава продукта с течением времени и т. д.

Перечисленные выше сценарии не исчерпывают всех возможных причин повышения давления. Так, возможно локальное повышение давления вследствие гидравлического удара, а также внутреннего взрыва. Однако в этом случае предохранительные клапаны защищаемую систему уже не спасут, требуются дополнительные инженерные решения.

К сожалению, невозможно исчерпывающе описать все случаи аварийного повышения давления в сложной технологической системе. Тем не менее, стандарт организации подробно анализирует возможные причины повышения давления в аппаратах различных типов — ректификационных колоннах, емкостной аппаратуре, адсорберах, экстракторах, а также линиях нагнетания насосов и компрессоров — и предлагает методы расчета требуемой пропускной способности для наиболее типичных ситуаций.

Разумеется, расчет требуемой пропускной способности не устраняет необходимость расчета фактической пропускной способности системы аварийного сброса и правильного выбора параметров настройки предохранительных клапанов. Этим проблемам, а также решающей их программе «Предклапан» посвящена отдельная статья в данном номере журнала.

Готовящееся в настоящее время новое издание СТО ИПН/НТП 12-01-2015 не только будет включать в себя обязательные требования к предохранительной арматуре, приведенные в ТР ТС 032/2013 «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением», но и расширит кругозор работников проектных организаций и предприятий, повысит их теоретическую и практическую подготовку в деле обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов.