

# ТРУБА – ЧТО ПРОЩЕ?

**В** технологических процессах нефтепереработки достаточно часто перемещение материальных потоков по трубопроводам в границах установок осуществляется в двухфазном парожидкостном состоянии. В качестве примера можно привести так называемые трансферные линии трубопроводов между технологическими печами и фракционирующими колоннами на установках атмосферной и вакуумной перегонки нефти. Высокие рабочие температуры (иногда выше температуры самовоспламенения), пожароопасность продуктов и их коррозионная активность, высокие линейные скорости потока закономерно определяют повышенное

**Краснов А. В.**, главный специалист технологического отдела АО «ИПН»,  
**Хурамшин Р. Т.**, заместитель генерального директора АО «ВНИИНП»,  
**Яицких Г. С.**, заместитель генерального директора АО «ИПН»,  
**Мельников Ю. А.**, главный инженер проекта АО «ИПН»

внимание к трансферным трубопроводам со стороны проектировщиков и эксплуатирующих технологические установки специалистов.

Ошибки на этапе проектирования приводят к проблемам при эксплуатации – возникает опасная вибрация, пульсации давления и расхода, механический износ элементов трубопровода вплоть до нарушения целостности трубопровода и невозможности дальнейшей его эксплуатации. В результате сокращается межремонтный пробег установки, увеличивается риск внеплановых остановок. Причины неправильной работы трубопроводов не всегда удается четко определить, однако не ставится под сомнение, что главным фактором является внутренняя гидромеханика транспортируемой среды.

В связи с этим считаем актуальным подготовку небольшого обзора по проблеме проектирования и эксплуатации двухфазных парожидкостных трубопроводов. В статье попытаемся последовательно рассмотреть основные критерии проектирования подобных трубопроводов, рассказать о некоторых характерных случаях неправильной работы трансферных трубопроводов.

Двухфазные парожидкостные течения существенным образом отличаются от любого однофазного течения (жидкости или газа). Одновременное присутствие двух фаз приводит к возможности существования потока с различной структурой или режимами течения. Существует большое число режимов течения двухфазных потоков, которые зависят от соотношения массовых расходов фаз, плотности, вязкости фаз, коэффициента поверхностного натяжения. Применительно к трансферным трубопроводам основными режимами течения являются [4, 6]: пузырьковый, расслоенные режимы (расслоенный гладкий и расслоенный волнистый), прерывистые режимы (снарядный и пробковый), кольцевой и дисперсно-кольцевой. Каждый режим имеет характерные черты в распределении жидкой и паровой фаз, которые позволяют выделять режим из

других типов. Приблизительно режимы течения определяют по специальным картам (графикам). В настоящее время для их построения используются так называемые механистические модели, описывающие характер течения и механизмы перехода от одного режима течения к другому на основе уравнений механики сплошной среды. Основы такого подхода были заложены Тейтелем, Даклером и Барнеа в 70–80-х годах прошлого века и получили

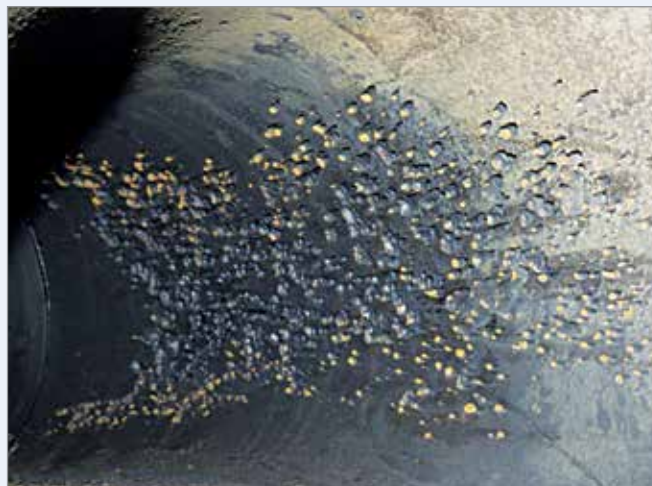


Рисунок 1 – Эрозия крутоизогнутого отвода (вид изнутри)

интенсивное развитие в последующих исследованиях.

От структуры потока зависит стабильность течения парожидкостной смеси в трубопроводе. Нестабильные режимы течения сопровождаются пульсацией давления и расхода, вибрацией и гидравлическими ударами. Очень важно ясно представлять себе, какой именно режим течения реализуется в тех или иных условиях и насколько этот режим будет приемлем для проектируемой трубопроводной системы.

## РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ

### ПУЗЫРЬКОВЫЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ

При таком режиме течения паровая фаза представлена в виде многочисленных пузырьков, распределенных в жидкой фазе. Встречается как в горизонтальных, так и в вертикальных трубопроводах.

### РАССЛОЕННЫЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ

Выделяют расслоенный гладкий и расслоенный волнистый режимы течения. При относительно низких скоростях паровой фазы происходит расслаивание фаз. Паровая фаза занимает верхнюю часть трубопровода. При увеличении скорости паровой фазы на поверхности слоя жидкой фазы возникают волны, гребни которых не перекрывают сечение трубы. Данные режимы могут существовать только в горизонтальных трубопроводах.

### ПРЕРЫВИСТЫЕ ТИПЫ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЙ

При дальнейшем увеличении скорости паровой фазы амплитуда волн жидкости достигает верхней части сечения трубы. Из этого режима выделяют два отдельных типа течений: пробковое и снарядное. При пробковом течении имеют место жидкостные пробки, разделенные паровыми пузырями, диаметр пузырей не превышает диаметра трубы, так что жидкая фаза продолжает непрерывно протекать по нижней части сечения трубопровода. При увеличении газосодержания и скорости паровой фазы паровые пузыри полностью занимают сечение трубы и разделяют жидкость на отдельные пробки (снаряды). Данные режимы течения являются опасными для трубопроводов, так как вызывают появление гидравлических ударов.

Для вертикального трубопровода появление снарядного режима и гидравлических ударов может быть дополнительно обусловлено эффектом

периодического захлебывания трубопровода. При высоком газосодержании и скорости паровой фазы, еще недостаточной для формирования устойчивого кольцевого режима, в нижней точке трубопровода начинает скапливаться жидкость. В определенный момент жидкость перекрывает сечение трубы, паровой поток выталкивает жидкий «снаряд» вверх, разгоняя его до больших скоростей. Далее процесс повторяется. Подобный жидкий «снаряд» часто является тем воздействием, ко-

пробивает жидкие пробки, с формированием кольцевой пленки на стенке трубы. Мелкодисперсная капельная жидкость находится в ядре потока. Газосодержание потока по сечению трубы увеличивается от нулевого на стенке до максимального на оси. Кольцевой и дисперсно-кольцевой режим течения в трубопроводе – стабильные режимы течения парожидкостной смеси, к которым необходимо стремиться во всем диапазоне производительности технологической установки

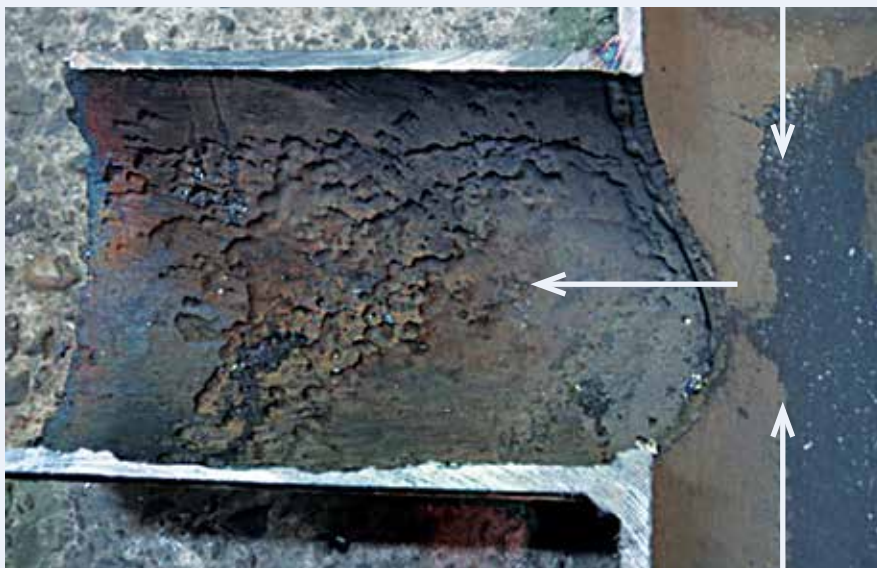


Рисунок 2 – Эрозия тройника, стрелками показано направление потоков

торого может быть вполне достаточно для обрыва трубопровода, раскрытия фланцев или повреждения арматуры.

Снарядный режим течения при эксплуатации легко выявляется по наличию низкочастотной вибрации трубопроводов большой амплитуды. Кроме гидравлических ударов при снарядном режиме пульсация расхода и давления негативно отражается на работе массообменного оборудования. Поэтому данного режима следует избегать при проектировании, выбирая соответствующие диаметры и угол наклона трубопроводов. При невозможности обеспечения условий для стабильного режима течения можно несколько снизить ударное воздействие, например исключением арматуры (особенно обратных клапанов), применением отводов с радиусомгиба не менее 3-х трубных диаметров, использованием неподвижных опор.

### КОЛЬЦЕВОЙ И ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОЙ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ

Дальнейший рост скорости пара приводит к тому, что паровая фаза

при проектировании трансферных трубопроводов.

Кроме вибрации и пульсаций параметров другой часто встречающейся серьезной проблемой трансферных трубопроводов является повышенный коррозионно-эрозионный износ его составных элементов. В условиях двухфазности течения эрозия является результатом взаимодействия двух систем: потока пара, содержащего жидкие (иногда и твердые) частицы, и материала трубопровода. Скорость поверхностной эрозии зависит от гидродинамических параметров течения потока: скорости фаз, режима течения, размера капель жидкости, наличия жидких пленок и твердых микрочастиц. Сочетание указанных факторов определяет механизм и особенности нагружения и разрушения материала. Также для оценки возможности эрозии необходимо учитывать прочностные свойства материала, наличие коррозионно-активных компонентов продукта, угол атаки потока к поверхности. В зависимости от интенсивности коррозионного и эрозионного процессов определяющей будет



либо коррозия, либо силовое воздействие двухфазного потока (ударно-капельное нагружение металла).

Разрушение элементов трубопровода является следствием ударно-капельного нагружения, процесс которого связан с появлением в ядре потока крупных капель жидкости, которые увлекаются потоком и разгоняются до скоростей, близких к скорости несущей паровой фазы. Механизм образования капельной жидкости в ядре потока может быть разным, это могут процессы конденсации в скачках уплотнений при критических условиях течения (подробно об этом ниже) или отрывные пристеночные течения в местных сопротивлениях (отводы, диффузоры, арматура).

Можно привести характерный пример: технологическая установка ЭЛОУ-АВТ-2 с производительностью по сырой нефти 2,5 млн тонн в год на одном из НПЗ Дальнего Востока. В вакуумном блоке отмечен сильный эрозионный износ трансферного трубопровода. Участки эрозии локализованы в местах поворотов трасс (отводах) трубопроводов (см. рисунок 1). Наиболее интенсивной сквозной эрозии подверглись отводы непосредственно на выходе из печи. Также отмечена эрозия в других отводах на глубину 4–5 мм в течение 1 года работы блока на производительности 70% от номинальной, что недопустимо велико и значительно превышает скорость коррозии, заложенную проектировщиком. По проекту печные змеевики выполнены с переменным диаметром, увеличивающимся по ходу движения потока: DN 100 мм → DN 150 мм → DN 200 мм → DN 250 мм. На выходе из печи сразу после фланцевой пары штуцера предусмотрен переход (диффузор) на DN 300 мм, далее прямой короткий участок постоянного диаметра ( $l = 0,3$  м), после которого расположен крутоизогнутый отвод. Поверочный расчет трубопровода показал, во-первых, наличие кольцевого режима течения на выходе из печи; во-вторых, достижение потоком в диффузоре скорости течения, равной скорости звука. Используя эти данные, картину течения можно представить следующим образом [3, 5]. При прохождении потоком диффузора на внутренней поверхности конуса возникает вихревая зона с обратным течением, приводящая к срыву и дроблению жидкой пленки, с образованием крупных вторичных

капель и их переносом в ядро потока. В связи с наличием короткого прямого участка (длиной всего 0,3 м) между диффузором и отводом обратный возврат капель в пленку и повторное формирование кольцевой структуры двухфазного потока не успевает произойти, так как вихревой след от местного гидравлического сопротивления растягивается на расстояние до 10 трубных диаметров. Образовавшаяся подобным образом парокapельная смесь на высокой скорости воздействует на стену отвода, вызывая механический износ металла.

В подобных случаях необходимым условием для снижения скорости эрозии будет стабилизация потока после местного сопротивления на прямом участке постоянного диаметра длиной 5÷10 трубных диаметров. Снижение каплеударного воздействия может быть достигнуто уменьшением угла атаки потока к поверхности; в отводах это достигается увеличением радиусагиба до 3-х и более диаметров, а в вытяжных тройниках – уменьшением угла поворота.

Скорость парожидкостного потока непрерывно меняется по длине трубопровода. Ускорение потока происходит за счет его расширения при прохождении трубопроводных участ-

потоком скорости звука ( $M = 1$ , где  $M$  – число Маха). Скорость звука в двухфазных парожидкостных смесях всегда ниже скорости звука в любой отдельной компоненте системы – паровой и жидкой, поэтому критические условия могут образоваться уже при скорости потока около 100 м/с.

В критических сечениях происходит переход от звуковой скорости ( $M = 1$ ) к дозвуковой ( $M < 1$ ) скачкообразно (разрывно) с образованием ударной волны или скачка уплотнения – таково свойство течений сжимаемых сред. В скачках уплотнений возникают градиенты давления, температуры и плотности, при определенных условиях может возникать спонтанная конденсация [3] (или скачки конденсации), которая приводит к появлению в ядре потока новой жидкой фазы. Эта капельная жидкость, разгоняемая паровой фазой до скоростей, близких к скорости пара, при встрече со стенкой трубопровода вызывает его ударно-капельное нагружение.

Из накопленного специалистами АО «ИПН» опыта реконструкций трансферных трубопроводов стоит выделить следующую особенность – очень часто в трансферных трубопроводах интенсивные процессы



**Рисунок 3 – Эрозия сборного коллектора DN 500 мм, расположенная с небольшим смещением по отношению к оси боковой врезки**

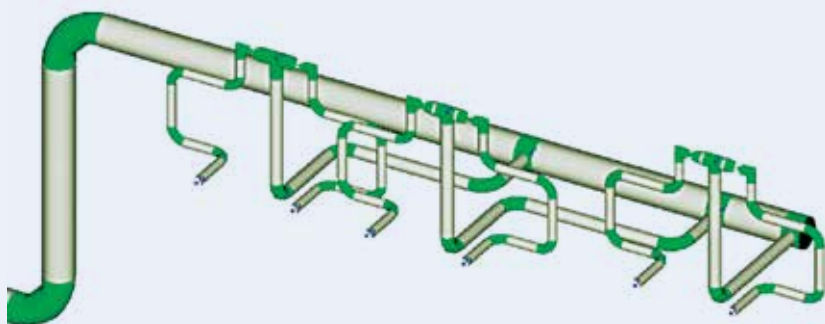
ков постоянного диаметра и местных сопротивлений, торможение потока происходит при прохождении диффузоров; при этом происходит частичное восстановление статического давления потока. При непрерывном изменении скорости потока предельным состоянием является критический режим, т. е. достижение

коррозии и эрозии сопутствуют критическим условиям течения потока внутри труб. И локализация зон эрозии совпадает с расположением критических сечений.

Течения потоков в трубопроводах с околосвуковыми скоростями стараются избегать, так как это сопровождается вибрацией, повышенными

механическими нагрузками на трубопровод и звуковыми эффектами (шум). Дополнительно следует учитывать, тот факт, что коэффициенты местных сопротивлений в базах данных расчетных

(см. рисунок 3). При обследовании установки было установлено, что причиной вибрации является неправильная ориентация потоков при их слиянии в тройниках. В проекте было принято



**Рисунок 4 – Модель участка трансферного трубопровода установки ЛК-бу до реконструкции в программе «Гидросистема»**

программ и справочниках [5] определены преимущественно путем обработки экспериментальных данных для существенно дозвуковых течений. Поэтому их распространение на критические и околокритические скорости может приводить к снижению достоверности результатов расчета.

С учетом вышеприведенных причин, АО «ИПН» в своей практике проектирования парожидкостных трубопроводов по скорости потока ограничивается величиной не более  $0,7 \div 0,8$  М. За предельно допустимую скорость потока, также можно принимать скорость, рассчитанную по формуле стандарта API 14E [1], согласно которому не рекомендуется превышать скорость потока более  $v_e = c/\sqrt{\rho_{\text{мик}}}$ , где  $c$  – постоянная, зависящая от рабочих условий трубопровода, и для большинства случаев принимается равной 100;  $\rho_{\text{мик}}$  – плотность парожидкостной смеси.

Дополнительно приведем еще один пример неудачной конфигурации трансферного трубопровода. Многосекционная трубчатая печь комбинированной установки ЛК-бу на НПЗ ближнего зарубежья, в каждой секции смонтированы два змеевика, с последующим объединением потоков из каждой секции в стандартных тройниках за пределами печи (см. рисунок 4). После тройников потоки из каждой секций печи объединяются в одном общем сборном коллекторе DN 500 мм, по которому далее нефть поступает в колонну. При эксплуатации на участках тройников слияния потоков отмечен повышенный уровень вибрации, а во время ремонта дополнительно выявлена сильная эрозия (см. рисунок 2). Также эрозия отмечена и в сборном коллекторе напротив врезок

встречное направление потоков, при этом происходит турбулентное смешение двух встречно-направленных потоков с большими скоростями, и как следствие – гидравлические удары, сопровождаемые большими потерями и пульсациями давления, явлениями отрыва жидкой пленки со стенок. Это и явилось основной причиной эрозии и вибрации. При реконструкции данного трансферного узла АО «ИПН» были исключены тройники, от каждого змеевика выполнен отдельный трубопровод с врезкой в сборный коллектор

под острым углом, все крутоизогнутые отводы были заменены на отводы с большим радиусом, при этом сборный коллектор был сохранен [7].

На основании многолетнего практического опыта специалистов АО «ИПН» можно сформулировать следующие основные подходы к разработке конфигурации трансферных трубопроводов:

- исключение крутых поворотов трасс (т. е. применение колен с острой кромкой и крутоизогнутых отводов);
- исключение строго вертикальных участков с восходящим течением;
- минимизация общей длины трубопровода;
- врезки в сборный коллектор под острым углом (не более  $45^\circ$ );
- применение симметричных тройников с острыми углами поворота (т. н. «косых» тройников);
- увеличение диаметров труб по ходу потока.

Необходимо также отметить важность правильного выполнения механической части проектирования трансферных трубопроводов, которая включает в себя:

- разработку системы опорных конструкций трубопроводов;
- комплекс прочностных расчетов и мероприятий по компенсации линейных температурных удлинений трубопровода;
- выбор материального исполнения трубопроводов.

**Проектирование трансферных трубопроводов – это совместная итерационная работа технолога и механика. Специалисты АО «ИПН» для теплогидравлических расчетов трансферных трубопроводов используют специализированный программный комплекс «Гидросистема 3,87», разработанный ООО «НТП Трубопровод». Расчетные модули «Гидросистемы» на наиболее точных и популярных расчетных методиках позволяют рассчитывать гидродинамические параметры двухфазного парожидкостного потока и тепловизиционные свойства транспортируемого продукта. К сожалению, значительное количество заводских трубопроводов, при проектировании которых не были учтены вышеуказанные факторы, подвержены сверхнормативной вибрации, разгерметизации, что в свою очередь нередко приводит к аварийным остановкам производств. Ежегодно специалисты АО «ИПН» и ООО «НТП Трубопровод» устраняют десятки дефектов монтажного проектирования на действующих предприятиях России и ближнего зарубежья.**

#### **Список использованной литературы:**

1. API 14E Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems.
2. Патнер А. В. Арматура для пара сверхкритических параметров. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 256 с.
3. Перельман Р. Г., Пряхин В. В. Эрозия элементов паровых турбин. – М.: Энергия, 1986. – 178 с.
4. Жидков А. Б., Герасимов Д. П., Денисов Д. Е., и др. Трубчатые нагревательные печи нефтепереработки и нефтехимии. – СПб.: 2015. – 104 с.
5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
6. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
7. Яицких Г. С., Мельников Ю. А., Шакимов С. Л. Проектирование трубопроводов технологических установок. – Трубопроводная арматура и оборудование. – 2015. – № 1 (76).

Москва, декабрь 2016 года