

Предложенная методика определения параметров первого участка лопастей может быть использована для вывода аналогичных зависимостей для второго и последующих участков лопастей радиально-осевой турбины.

При использовании методологии [1–4] полученные зависимости позволят найти скорости и давления среды на первый участок лопасти и по аналогии рассмотреть воздействие среды на последующие участки лопастей турбины.

### Литература

1. Павлечко, В.Н. Зависимость параметров центростремительной турбины от угла наклона лопастей / В.Н. Павлечко // Химическая промышленность. 2017. Т. 94. № 5. С. 247–254.

2. Павлечко, В.Н. О работе радиальной турбины при вводе закрученного потока / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. 2017. № 3. С. 52–64.

3. Павлечко, В.Н. О влиянии центробежной силы на работу радиальной турбины при вводе закрученного потока / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. 2017, № 4. С. 51–63.

4. Павлечко, В.Н. Изменение тангенциального давления среды на лопасти в каналах радиальной турбины / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. 2019. № 3. С. 29–35.

УДК 620.193

**Францкевич В.С., Поспелов А.В.**  
(БГТУ),  
**Романовский В.И.**  
(НИТУ «МИСиС»)

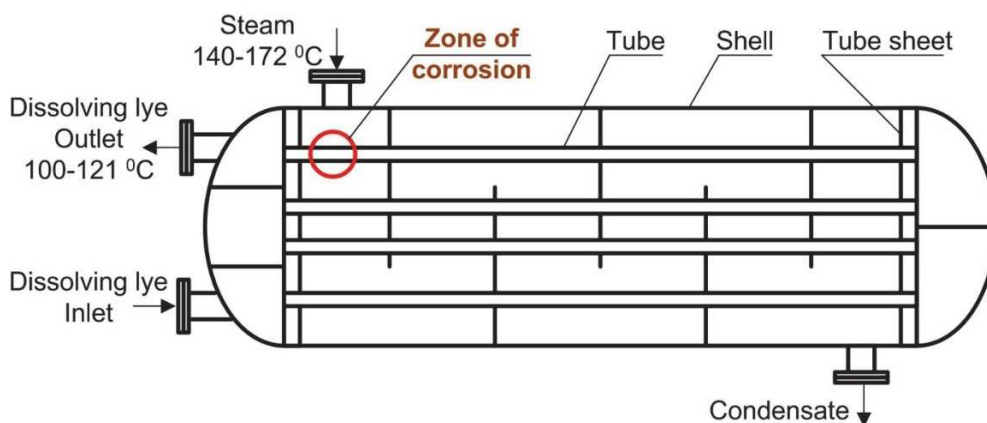
### **КОРРОЗИЯ ТИТАНОВЫХ ТРУБОК ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА**

Титан широко используется в химической обрабатывающей промышленности при работе со многими агрессивными средами из-за его хорошей коррозионной стойкости [1]. В то же время титан очень чувствителен к определенным воздействиям. Так, титановое оборудование может выйти из строя из-за воздействия среды с высоким содержанием водорода, что приводит к водородному охрупчиванию. Присутствие железа может служить катализатором выделения водорода [2-3]. Абразивный износ часто является причиной коррозии [13, 14]. Кроме того,

разрушение титановых трубок теплообменников может происходить вследствие усталостного разрушения [15] даже из-за небольших вибрации, вызванных гидравлическими ударами перекачиваемой жидкости [16].

В работе исследовано коррозионное разрушение теплообменника из титана, используемого для нагрева растворяющего щелока с высоким содержанием солей и наличием взвешенных твердых частиц под действием потока, давления и температуры до 121°C. На выходе растворяющегося щелока, в месте наивысшей температуры, трубка быстро разрушилась в течение нескольких месяцев работы из-за быстрого раскиснения, начинающегося изнутри труб.

Схема теплообменника и место коррозии показаны на рис. 1. Область коррозии – место, где щелок достигает максимальной температуры перед выходом из теплообменника.



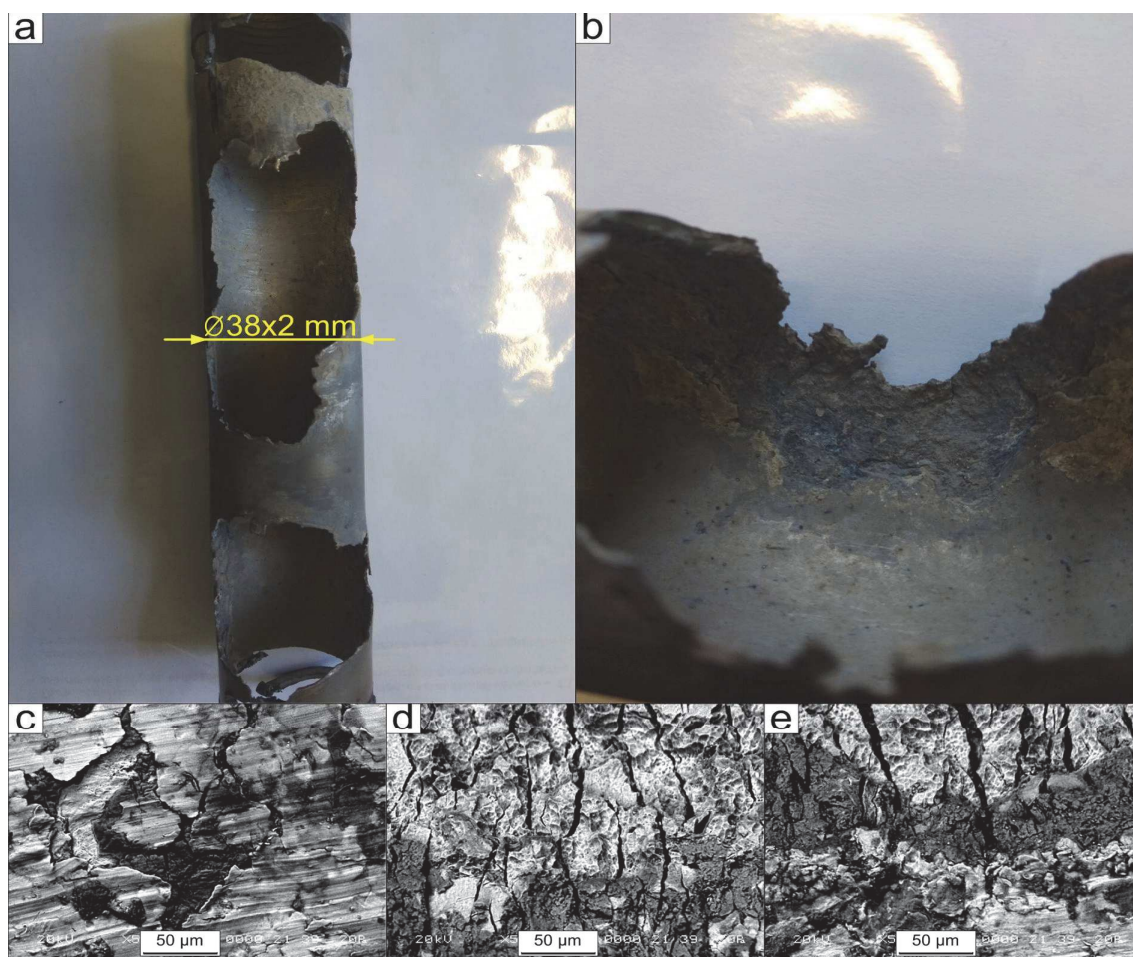
**Рисунок 1 – Схема кожухотрубного титанового теплообменника**

На рис. 2 показаны фотографии и изображения, полученные на сканирующем электронном микроскопе скорродированных титановых трубок теплообменника, используемого для нагрева растворяющегося щелока. На фотографиях (верхний ряд на рис. 2) показаны сантиметровые отверстия диаметром до 25 мм. По представленным образцам видно, что коррозия начинается с внутренней стороны трубки

Основываясь на нашей предыдущей работе [4], было предположено, что неправильная очистка оборудования в процессе его эксплуатации может быть причиной коррозии. По информации владельца теплообменника, процедура очистки включает в себя только механическое удаление накипи.

Чтобы выяснить, какие вещества вызвали сильную коррозию титановых трубок, были проанализированы продукты коррозии. Элементный анализ показал высокое значение содержания железа

на поверхности металлического титана на незатронутой продуктами коррозии области, что предполагает отложение примесей железа из растворяющегося щелока (например при прохождении его через железосодержащие участки сети). Железо, а также медь (Cu) и цинк (Zn) могут катализировать катодные реакции на металлическом титане. Содержание Fe, Cu и Zn еще в еще больших количествах обнаружены на скорродированной области. Поэтому было предположено, что отложение железа из растворяющегося щелока (за счет возможного выноса из железосодержащих участков сети) на поверхности титана может привести к увеличению выделения водорода. На пораженных коррозией областях наблюдался быстрый процесс растрескивания, проходящий как через оксид, так и через металл, без преобладания межкристаллитной коррозии или коррозионного растрескивания под напряжением. Это предполагает участие водородной хрупкости и внешних напряжений.



**Рисунок 2 – Фотографии (верхний ряд) и снимки СЭМ (нижний ряд), показывающие трещины миллиметрового и микрометрового размера и видимую коррозию**

Электрохимические измерения показывают явное влияние температуры с повышенным током коррозии и сниженным сопротивлением переносу заряда уже начиная с 60°C по сравнению с комнатной температурой, однако все еще с равной или более низкой плотностью тока пассивации. Начиная с температуры выше 80°C наблюдается заметное увеличение плотности тока пассивации, сильное уменьшение потенциала питтинга, дальнейшее сильное уменьшение сопротивления переносу заряда. Форма кривой Найквиста для 90°C по сравнению с другими температурами предполагает переход от защитного поверхностного оксида к оксиду с возможной диффузией. Кроме того, наблюдается явный сдвиг кривой потенциодинамической поляризации между 80 и 90°C, что свидетельствует о переходе от пассивного к более активному состоянию коррозии. Сильное влияние температуры выше 80°C предполагает, что разница температур в зоне выхода щелока, подверженной коррозии (место с максимальной температурой труб теплообменника), и остальной части титановых труб с более низкой температурой может играть роль в быстром распространении коррозии. Большая разница температур создает оптимальные условия для разделения на высокотемпературную область, которая может действовать как анод, а вся большая низкотемпературная часть может действовать как катод, ускоряя локализованную коррозию на анодном участке.

В целом, проведенные исследования показывают, что данное серьезное и быстрое коррозионное повреждение в основном было вызвано высокой температурой в пораженной области, разницей температур с непораженными областями, а также быстрым процессом растрескивания, который мог быть ускорен вибрациями, напряжениями вызванными давлением, и водородным охрупчиванием из-за наличия железа, вероятнее всего осаждающегося из растворяющего щелока, а также в некоторой степени из-за наличия Zn и Cu в составе материала труб.

Другими способствующими факторами были переносимые твердые частицы, приводящие к истиранию и трудностям репассивации, а также трещины и нагревание из-за отложений. Как известно, титан в растворах хлоридов при повышенных температурах склонен к щелочной коррозии. Схожий случай описан в статье [5], где такие факторы турбулентного потока, как наличие твердых частиц, перегрев и напряжения, вызванные отложениями / оксидами, были зарегистрированы как важные факторы коррозионного разрушения титанового теплообменника, подверженного воздействию углеводородов в межтрубном пространстве и морской воды в трубном.

Периодический неразрушающий контроль наиболее нагретых участков, более частая очистка от отложений и защита от абразивных

твердых частиц – это предлагаемые меры для продления срока службы данного теплообменного оборудования.

#### Литература

1. Boyer R, Welsch G, Collings EW. Materials properties handbook: titanium alloys. Materials Park (OH): ASM International; 1994.
2. Chen, F. J., Yao, C., Yang, Z. G. (2014). Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant Part I: Corrosion and wear. *Engineering Failure Analysis*, 37, 29–41.
3. Yang, Z. G., Gong, Y., Yuan, J. Z. (2012). Failure analysis of leakage on titanium tubes within heat exchangers in a nuclear power plant. Part I: Electrochemical corrosion.
4. Romanovski, V., Frantskevich, V., Kazlouski, V., Kasach, A., Paspelau, A., Hedberg, Y., Romanovskaia, E. (2020). Inappropriate cleaning treatments of stainless steel AISI 316L caused a corrosion failure of a liquid transporter truck. *Engineering Failure Analysis*, 117, 104938.
5. Covington L. C. (1979). The influence of surface condition and environment on the hydriding of titanium. *Corrosion*, 35(8), 378–382.

УДК 66.021.3

Мытько Д.Ю., Вайтехович П.Е.  
(БГТУ)

### **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗИГЗАГООБРАЗНОЙ РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРИРОВАННОЙ НАСАДКИ НА ВЕЛИЧИНУ ОТНОСИТЕЛЬНОГО БРЫЗГОУНОСА В МАССООБМЕННЫХ АППАРАТАХ**

Определение уноса проводилось на экспериментальной установке с диаметром массообменной колонны – 150 мм. Нами было сконструировано и изготовлено на 3D-принтере по три вида зигзагообразной насадки с длиной стороны ячеечного канала 12 мм, 17 мм, 22 мм. Далее будем использовать их следующие условные обозначения: 3-12; 3-17; 3-22 [1]. Основные пакеты насадки высотой 300 мм были набраны из трех равных секций. Для определения количества унесенной жидкости на расстоянии 500 мм над насадкой устанавливался гравитационный сепаратор с отбойником. В дополнительной серии опытов в структуру насадки вносилось два изменения. Первое заключалось в том, что отдельные ее секции раздвигались с образованием между ними