

УДК 532.546:536.24
ББК 30.124:31.31
3-58

Кафедра Технологии химического производства,
Университет Суррея

Руководитель:
Профессор, д. т. н. Х. Мюллер-Штайнхаген, член Королевской академии
технических наук

3-58 Зеттлер Х. У. Влияние свойств поверхности и распределения потока на загрязнение поверхностей теплообмена – СПб.: Страта, 2014. – 44 с.

ISBN 978-5-906150-13-4

Загрязнение поверхностей и коррозия являются наиболее серьезными проблемами для разработчиков и предприятий, эксплуатирующих промышленное оборудование, в частности, теплообменники. В настоящей работе изучено влияние свойств поверхности (шероховатости и свободной энергии) на формирование кристаллических, биологических и парафиновых отложений, а также на процесс коррозии.

Предназначена для специалистов-теплотехников, занимающихся решением теоретических и прикладных задач по тепло- и массообмену.

Издание может быть полезно для студентов, обучающихся по направлению "Теплоэнергетика и теплотехника", "Ядерная энергетика и технологии", "Физика".

ISBN978-5-906150-13-4

© Hans Ulrich ZETTLER, 2002
© Издательство «СТРАТА», 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	13
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ	17
БЛАГОДАРНОСТИ	20

I. ВВЕДЕНИЕ.....	21
------------------	----

ГЛАВА II.

Основы процесса загрязнения	31
2.1 Механизмы загрязнения	31
2.2 Стадии загрязнения	34
2.3 Кривые загрязнения и скорость его роста.....	35
2.5 Затраты на борьбу с загрязнениями	45
2.6 Методы удаления загрязнения и смягчение его последствий	48

ГЛАВА III.

Загрязнение систем водяного охлаждения.....	51
3.1 Кристаллизационное загрязнение и кристаллизация солей	51
3.1.1 Растворимость CaSO_4	52
3.1.2 Водный раствор сульфата кальция	55
3.1.3 Нуклеация или зарождение центров кристаллизации.....	57
3.1.4 Рост кристаллов.....	59
3.2 Биологическое загрязнение.....	62
3.2.1 Речная вода Рейна (Германия)	64

ГЛАВА IV.

Отложение парафина в оборудовании нефтегазовой промышленности.....	67
4.1 Отложения парафина в трубопроводах	67
4.2 Механизмы отложения парафина	67
4.3 Процесс отложения парафина	70
4.3.1 Свойства парафиновых углеводородов	71

Содержание

4.3.2 Механизм отложения парафина в трубопроводе	72
4.3.3 Параметры, влияющие на отложение парафинов	73
4.3.3.1 Время	73
4.3.3.2 Скорость потока	75
4.3.3.3 Температура	78
4.3.3.4 Концентрация	81
4.3.3.5 Примеси	82
4.3.3.6 Свойства поверхности	83
4.3.4 Старение	83
4.3.5 Накопление и удаление	84
 ГЛАВА V.	
Характеристика поверхности и методы ее модификации	85
5.1 Краевой угол и поверхностная энергия	85
5.1.1 Краевой угол	85
5.1.2 Поверхностная энергия	86
5.2 Расчет поверхностной энергии	88
5.2.1 Метод Owens, Wendt, Rabel и Kaelbelle	88
5.2.2 Метод Schulz	89
5.3 Прибор для измерения краевых углов. Методика измерения	92
5.4 Структура поверхности	94
5.4.1 Щуповой метод измерения шероховатости	98
5.4.2 Атомно-силовой микроскоп	99
5.5 Методы модификации поверхности	101
5.5.1 Ионная имплантация	102
5.5.2 Ионное распыление/несбалансированное магнетронное распыление	108
5.5.3 Карбонитрация и оксидирование	109
5.5.4 Покрытие Ni-P-ПТФЭ	111
5.5.5 Метод химического осаждения из пара	114
5.5.6 Кистевая гальванотехника	116
5.5.7 Модификация поверхностной шероховатости	117
5.5.7.1 Электрополирование	117
5.5.7.2 Травление	118
5.5.8 Свойства поверхностей и загрязнение — известные на сегодня данные	119
 ГЛАВА VI.	
Снижение отложений	
парафина методом модификации поверхности	126
6.1 Экспериментальный стенд для исследований	
отложений парафина	127

6.1.1 Экспериментальный стенд для динамических испытаний	128
6.1.2 Приготовление раствора парафина	131
6.1.3 Подготовка к измерениям	132
6.1.4 Завершение измерений	132
6.2 Результаты измерений и обсуждение методов снижения отложений парафина в нефтегазовой промышленности	133
6.2.1 Свойства поверхности	133
6.2.2 Измерения методом «холодного пальца»	138
6.2.3 Экспериментальные исследования при течении раствора	141
6.2.3.1 Порядок испытаний	141
6.2.3.2 Влияние расхода раствора на отложение парафина	141
6.2.3.3 Влияние шероховатости поверхности на отложение парафина	143
6.2.3.4 Влияние поверхностной энергии на отложение парафина	149

ГЛАВА VII.

Пластинчатые теплообменники	157
7.1 Конструкция пластинчатых теплообменников	157
7.2 Теплопередача в пластинчатых теплообменниках	162
7.3 Потери давления в пластинчатых теплообменниках	164
7.4 Структура потока в каналах пластинчатых теплообменников	167
7.5 Влияние загрязнения на эффективность пластинчатых теплообменников	168
7.6 Учет загрязнения при проектировании и эксплуатации пластинчатых теплообменников	170

ГЛАВА VIII.

Борьба с отложениями в пластинчатых теплообменниках для охлаждения воды	172
8.1 Экспериментальное оборудование и методика исследований	173
8.1.1 Гидравлическая схема экспериментального стенда в университете Суррея	173
8.1.2 Гидравлическая схема экспериментальной установки BASF AG	176
8.1.3 Пластинчатый теплообменник	178
8.1.4 Сбор данных	181
8.1.5 Анализ погрешностей измерений на экспериментальных стендах с пластинчатыми теплообменниками	184
8.1.6 Приготовление раствора сульфата кальция	184
8.1.7 Определение концентрации сульфата кальция	185

Содержание

8.2 Результаты эксперимента и их обсуждение	186
8.2.1 Снижение кристаллизационного загрязнения	186
8.2.1.1 Условия эксперимента	186
8.2.1.2 Поверхностные свойства пластин теплообменника	188
8.2.1.3 Необработанные пластины теплообменника и воспроизводимость результатов	194
8.2.1.4 Влияние угла наклона гофр	197
8.2.1.4.1 Потери давления при отсутствии загрязнений	197
8.2.1.4.2 Теплопередача при отсутствии отложений	199
8.2.1.4.3 Образование отложений	201
8.2.1.5 Влияние модификации поверхности на образование отложений CaSO_4	203
8.2.1.5.1 Ионная имплантация пластин теплообменников	203
8.2.1.5.2 Ионное напыление, карбонитрация и оксидирование пластин	208
8.2.1.5.3 Пластины с никель-политетрафторэтиленовым покрытием	215
8.2.1.5.4 Пластины с различной шероховатостью поверхности	221
8.2.1.5.5 Загрязнение и свойства поверхности	224
8.2.2 Снижение биологического загрязнения пластинчатых теплообменников	231
8.2.2.1 Перечень опытов	232
8.2.2.2 Первоначальные эксперименты с необработанными пластинами	233
8.2.2.3 Влияние модификации поверхностей пластин	235
8.2.2.4 Хлорирование воды из Рейна	239
 ГЛАВА IX.	
Предшествующие исследования гидродинамики пластинчатых теплообменников	243
9.1 Результаты предыдущих исследований потока в пластинчатых теплообменниках	245
9.2 Численные исследования гидродинамики	247
 ГЛАВА X.	
Экспериментальные исследования методом отслеживания траектории радиоактивных частиц	256
10.1 Основы метода отслеживания траектории излучающей позитроны частицы (PERT)	256
10.2 Экспериментальная установка	257

10.3 Методика испытаний	259
10.4 Результаты РЕРТ–исследования и их анализ	259

ГЛАВА XI.

Численные исследования потока теплоносителя

в пластинчатом теплообменнике	265
11.1 Базовая геометрия пластины Alfa Laval M3	266
11.2 Геометрия расчетного объема и построение сетки	269
11.3 Изотермический турбулентный поток в канале между пластинами с углами наклона гофр 60°/60°	269
11.3.1 Численные результаты и их анализ	271
11.4 Турбулентное течение и теплообмен в каналах между пластинами с углами наклона гофр 30°/30° и 60°/60°	277
11.4.1 Результаты численных исследований течения жидкости в канале между пластинами с углами наклона гофр 60°/60° и их анализ	279
11.5 Исследование влияния формы рифления	294
11.5.1 Асимметричное рифление	294
11.5.2 Пластины с ячеистым рифлением	300
11.6 Сравнение характеристик теплообмена, потерь давления и загрязнения каналов между пластинами различных конструкций	307
11.7 Моделирование ламинарного потока в канале между пластинами Alfa Laval M3	311
11.7.1 Результаты расчета и их сравнение с данными РЕРТ-анализа	313
11.8 Оптимизация конструкции распределительной зоны канала пластинчатого теплообменника	318
11.8.1 Результаты расчета и их анализ	319

ГЛАВА XII.

Итоги исследований и дальнейшие планы	323
12.1 Заключение	323
12.1.1 Исследование загрязнения пластинчатых теплообменников ..	326
12.1.2 Отложения парафина	333
12.1.3 Коррозия	339
12.1.4 Экспериментальные и численные исследования движения жидкости в пластинчатом теплообменнике	340
12.2 Взгляд в будущее. Планы дальнейших исследований	347
12.2.1 Численные и экспериментальные исследования свойств поверхно- сти и их загрязнения	347

Содержание

12.2.2 Расчетные и экспериментальные исследования по созданию пластинчатых теплообменников	351
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	354
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	369
Греческие символы	373
Безразмерные величины	375
Индексы	375
ПРИЛОЖЕНИЕ А.	
Борьба с коррозией в нефтегазовой промышленности	376
А 1. Коррозия в нефтегазовой промышленности	376
А 1.1. Коррозия в нефтегазовой промышленности	376
А 1.1.1. Причины коррозии оборудования для транспортировки нефтепродуктов	376
А 1.1.2. Материалы, используемые в оборудовании для транспортирования нефти	379
А 1.1.3. Углекислотная коррозия оборудования нефтегазовой промышленности	380
А 1.1.4. Борьба с коррозией с помощью ингибиторов и различных способов обработки поверхности	387
А 2. Экспериментальная установка для изучения коррозии (ВР)	388
А 2.1. «Карусельный» тест	388
А 2.2. Пузырьковый тест (Bubble Test)	388
А 2.3. Электрохимические измерения коррозии (эксперименты с плоскими пластинами)	391
А 2.4. Образцы углеродистых сталей	394
А 3. Борьба с коррозией в нефтегазовой промышленности.	
Экспериментальные результаты	395
А 3.1. Регистрация экспериментов	395
А 3.2. Шероховатость поверхности	396
А 3.3. Твердость	397
А 3.4. «Пузырьковый тест» с использованием электродов	398
А 3.5. «Пузырьковый тест» с плоскими пластинами	400
ПРИЛОЖЕНИЕ В.	
Современный опыт борьбы с парафиновыми отложениями	403
В 1. Средства защиты от загрязнения нефтепроводов	403

В 1.1. Ингибиторы	404
В 1.2. Очистка труб ёршем	406
В 1.3. Комбинированное использование ингибиторов и очистки ершами	407
В 1.4. Прокачка горячей нефти	408
В 1.5. Подогрев труб	409

ПРИЛОЖЕНИЕ С.

Математическое моделирование течения

в пластинчатых теплообменниках	410
С 1. Математическая постановка задачи	410
С 1.1. Уравнение сохранения массы	410
С 1.2. Уравнение сохранения импульса	411
С 1.3. Уравнение сохранения энергии	414
С 2. Уравнения движения турбулентного потока	414
С 2.1. Прямое численное моделирование турбулентного потока	414
С 2.2. Модель больших вихрей	415
С 2.3. Усреднение по времени параметров турбулентного течения	415
С 3. Модели турбулентности	417
С 3.1. Модель напряжений Рейнольдса	417
С 3.2. Модель Спаларта-Альмараса	418
С 3.3. Стандартная k-ε модель	420
С 3.4. Модель RNG k-ε	421
С 4. Пристеночные граничные условия для турбулентного потока	423
С 4.1. Пристеночные функции	424
С 4.2. Пристеночная модель	425
С 5. Основы метода конечных элементов	425
С 6. Программный пакет	427

ПРИЛОЖЕНИЕ D.

Математическое моделирование загрязнения пластинчатых

теплообменников	431
D 1. Моделирование	431
D 2. Определение сопротивления загрязнения	431
D 2.1. Результаты и их анализ	434
D 3. Учет шероховатости теплопередающей поверхности в математической модели загрязнения	440
D 3.1. Результаты и их обсуждение	444