

УДК 620.193

## Проблемы коррозионной стойкости оборудования в химико-фармацевтической промышленности

К. Р. Таранцева

Пензенская государственная технологическая академия

E-mail: kr@pgta.ac.ru

Статья поступила в редакцию 16.10.2006

Рассмотрены проблемы коррозионной стойкости оборудования в химико-фармацевтической промышленности. Показано, что в отрасли существуют большие потери от коррозии, обусловленные как особенностями производства, так и отсутствием специального подхода к выбору коррозионно-стойких материалов и способов защиты от коррозии оборудования в процессах получения лекарственных средств. Предложены научные и инженерные основы для решения коррозионных проблем в химико-фармацевтической промышленности.

**П**роблема коррозионной стойкости оборудования в химико-фармацевтической промышленности является достаточно острой [1]. Доля затрат на проведение текущего и капитального ремонтов оборудования по причине коррозии в отрасли составляет до 13 % от общих затрат на проведение данных видов ремонта. При этом косвенные потери от коррозии в отрасли значительно превышают прямые потери, поскольку продукты коррозии ухудшают качество лекарственных веществ, в большинстве случаев катализируют их разложение и снижают выход при производстве [2].

Наиболее распространенным видом коррозии химико-фармацевтического оборудования является питтинговая [1, 3—5]. Это связано с тем, что основным конструкционным материалом оборудования являются нержавеющие стали, а в состав преобладающего большинства реакционных сред входят хлориды, бромиды и другие галогениды. Основные потери из-за питтинговой коррозии наблюдаются на заводах, производящих синтетические лекарственные средства, в частности полусинтетические антибиотики, получение которых отличается особо жесткими условиями синтеза и широким применением хлоридсодержащих сред.

Указанные потери в отрасли обусловлены в частности тем, что выбор конструкционных материалов и способов защиты от коррозии при аппаратном оформлении технологических процессов получения лекарственных средств, как правило, проводится без учета реальных условий эксплуатации оборудования. До сих пор не существует на-

учно обоснованного подхода к процессу выбора коррозионно-стойких материалов в производствах лекарственных средств. Сугубо формальный выбор материалов, заимствованный из опыта химической промышленности, не годится по ряду причин, главной из которых является высокое требование к чистоте конечного продукта.

Из-за сравнительно небольших объемов выпуска большей части лекарственных средств и быстрого обновления их номенклатуры в химико-фармацевтической промышленности широкое распространение получили совмещенные технологические схемы производства, позволяющие быстро переходить от получения одного препарата к выпуску другого на одной и той же аппаратуре. При этом состав сред, используемых в синтезе, очистке и выделении лекарственных средств, и условия проведения процесса могут существенно различаться.

Разнообразие габаритов реакционного оборудования, применяемого на различных стадиях получения лекарственных средств (от 0,1 до 100 м<sup>3</sup>), проведение технологических процессов в условиях резких температурных перепадов ограничивают использование эмалированного и стеклянного оборудования. Если оборудование из нержавеющей стали служит от 2 до 10 лет, то срок службы оборудования с покрытием из эмали в ряде случаев составляет несколько месяцев [5]. Вследствие этих и ряда других причин основными конструкционными материалами в химико-фармацевтической промышленности остаются нержавеющие стали.

Недостаток специалистов по коррозии в отрасли усугубляет положение дел. В результате противокоррозионная защита оборудования химико-фармацевтических производств осуществляется главным образом на стадии проектирования аппаратуры, а эффективность ее существенным образом зависит от правильности решения, выбранного конструктором. В условиях явной недостаточности данных о коррозионной стойкости материалов в сложных комплексных средах химико-фармацевтических производств и отсутствия достаточно

надежных инженерных методик их выбора, корректное решение принимается далеко не всегда.

В ближайшие годы намечается массовое техническое перевооружение российских химико-фармацевтических предприятий в связи с поэтапным до 2008 г. внедрением требований международного стандарта качества лекарственных средств. Поэтому особо актуальной становится разработка научно обоснованного подхода к выбору коррозионно-стойких материалов для технологического оборудования, позволяющего оптимизировать режимы эксплуатации конструкционных материалов, снизить коррозионные потери и повысить качество готовых лекарственных форм.

Оптимальным решением проблемы для отрасли может стать экспертная система по коррозии, в основу которой был бы заложен указанный научный подход. Применение экспертной системы на различных стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации оборудования позволит уменьшить существующий разрыв между достижениями коррозионной науки и их практическим использованием. Разработка экспертной системы потребует усилий многих специалистов — экспертов по коррозии, технологов, инженеров-конструкторов, программистов и др. Не исключено, что экспертная система по выбору коррозионно-стойких материалов для химико-фармацевтической промышленности может быть частью общей экспертной системы по коррозии, охватывающей и другие отрасли и производства.

Нами не обнаружено экспертных систем по коррозии конструкционных материалов, используемых в химико-фармацевтической промышленности, ни в России, ни за рубежом. Кроме того, применение в нашей стране имеющихся на западе экспертных систем по коррозии [6] затруднено по причинам различия химического состава и свойств используемых конструкционных материалов, способов формообразования деталей, технологий проведения процессов, стандартов, руководящих и нормативных материалов и пр. В связи с этим назрела необходимость разработки экспертных систем по коррозии, адаптированных к нуждам отечественных потребителей, к которым в первую очередь относятся конструкторы — разработчики новой техники, технологи и инженеры, отвечающие на производстве за антикоррозионную защиту.

Основу любой экспертной системы составляют базы данных и базы знаний. Анализ ситуации показал, что особую сложность при создании таких баз представляют локальные виды коррозии, в частности, питтинговая коррозия. Именно по этой причине большинство имеющихся за рубежом экспертных систем посвящены общей и газовой коррозии, а локальным видам коррозии посвящены лишь узкоспециализированные базы данных [6]. На пути успешного создания баз данных и баз зна-

ний по питтинговой коррозии имеется ряд трудностей и среди них отсутствие:

- корректных методик оценки питтингостойкости нержавеющей сталей в движущихся средах;
- критерия питтингостойкости, позволяющего четко определить границы устойчивой и неустойчивой пассивности;
- количественных зависимостей питтингостойкости сталей от внешних и внутренних факторов коррозионной системы;
- надежных методик прогнозирования питтинговой коррозии, в том числе в движущихся средах.

Питтингостойкость нержавеющей сталей зависит от большого числа как внутренних факторов коррозионной системы, связанных с природой, составом сплава, его структурой и состоянием поверхности, так и внешних факторов и, прежде всего, от состава раствора, температуры и движения среды. Количественный анализ совместного влияния этих факторов на сегодняшний день сделать сложно по причине недостаточности и низкой информативности справочных данных по коррозионной стойкости нержавеющей сталей в различных средах. Кроме того, в ряде случаев полученные данные затруднительно использовать из-за проведения исследований в неконтролируемых по гидродинамике и массопереносу условиях на моделях, не отражающих основные закономерности развития питтингов.

Для решения указанных задач нами были разработаны методика и установка для исследования питтингостойкости нержавеющей сталей в контролируемых условиях по гидродинамике [7, 8], а также методика исследования многопараметрических зависимостей [9—11].

Установка представляла собой модификацию известной системы двух соосных горизонтальных параллельных дисков, один из которых неподвижен, а второй — вращается [12]. В нижнем неподвижном диске располагали полностью активированный микроэлектрод, являвшийся моделью одномерного цилиндрического питтинга с активным дном и инертными стенками. Установка позволяла создавать контролируемые, хорошо воспроизводимые условия течения жидкости над поверхностью модельного питтинга и исключать принудительный вынос продуктов коррозии из питтингов за счет центробежных и гравитационных сил.

Предложенная методика исследования многопараметрических зависимостей базировалась на основных положениях теории прогнозирования и планирования эксперимента и позволяла исследовать питтингостойкость нержавеющей сталей как функцию нескольких переменных [9—11].

Для формирования базы знаний необходимы формализация знаний по коррозии и корректные методики прогнозирования коррозионной стойкости сталей. Коррозионные процессы с трудом поддаются формализации и наибольшему сложности

при этом представляют локальные виды коррозии. Сложность формализации знаний по питтинговой коррозии, прежде всего, обусловлена тем, что используемые в настоящее время критерии питтингостойкости далеко не всегда позволяют достаточно надежно разграничивать области потенциалов стабильной и метастабильной пассивности сталей [13]. Это обстоятельство ограничивает применимость известных критериев для прогнозирования питтингостойкости нержавеющей сталей в средах химико-фармацевтических производств, для которых основным требованием при определении границ безопасной эксплуатации оборудования является полное исключение вероятности возникновения питтингов.

С учетом недопустимости попадания продуктов коррозии в лекарственные средства в качестве граничного потенциала питтингообразования при определении границ питтингостойкости сталей в хлоридсодержащих средах химико-фармацевтической промышленности нами был использован потенциал образования солевой пленки  $E_{сп}$  [14]. В отличие от применяемых в настоящее время граничных потенциалов питтинговой коррозии, потенциал образования солевой пленки имеет термодинамический смысл — это потенциал анионной активации металла, при котором наступает равновесие на границе металла с солевой пленкой. Потенциал образования солевой пленки позволяет охарактеризовать условия пассивации для любого питтинга на макроэлектроде, при которых вероятность дальнейшего существования питтинга  $W \rightarrow 0$ .

При потенциалах отрицательнее потенциала образования солевой пленки переход от оксидной пленки к солевой кинетически затруднен, и в этой области потенциалов депассивированные по какой-либо причине участки поверхности повторно пассивируются, т. е. это область потенциалов стабильной пассивности (рис. 1). При потенциалах положительнее потенциала образования солевой пленки пассивная пленка нестабильна и склонна замещаться солевой пленкой (так называемая "область метастабильной пассивности") [13].

Наши исследования показали, что потенциал образования солевой пленки позволяет четко разделить области устойчивой и неустойчивой пассивности, отличается высокой стабильностью и воспроизводимостью [15–17], имеет выраженные зависимости от состава раствора, состава стали, скорости движения среды [15–20] (рис. 2–7).

Серьезным препятствием на пути создания базы данных является отсутствие надежных методик прогнозирования питтингостойкости сталей, в том числе, в движущихся средах. В настоящее время для прогнозирования питтинговой коррозии используют методы экстраполяции, математическое моделирование (стохастический и детерминированный подходы) и метод экспертных оценок.



Рис. 1. Диаграмма питтингостойкости стали 12X18H10Т в 3 N растворе NaCl при 343 К:  
1 — Фладе-потенциал ( $E_F$ ), 2 — потенциал образования солевой пленки ( $E_{сп}$ ), 3 — потенциал питтингообразования ( $E_{по}$ )

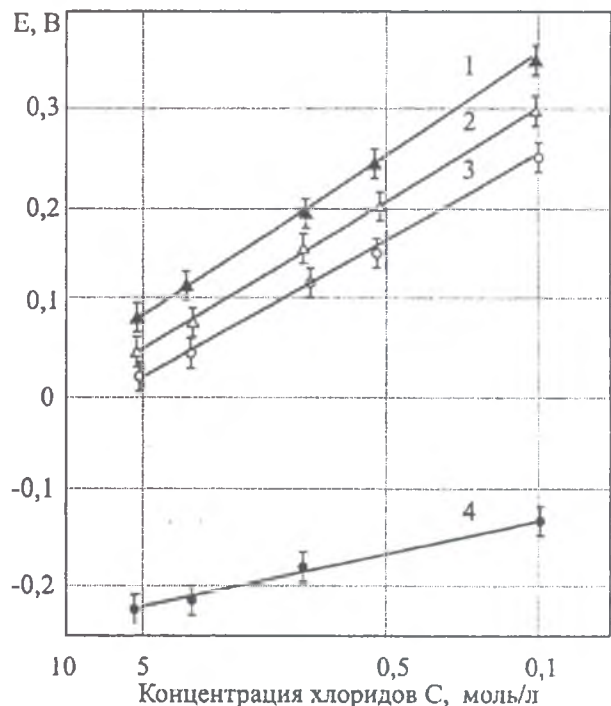


Рис. 2. Влияние концентрации хлоридов на величину потенциалов питтингообразования (1), минимального гальваностатического потенциала питтинговой коррозии (2), репассивации (3) и потенциала образования солевой пленки (4);  $T = 298$  К

Достоверность и точность экстраполяционного прогноза, в первую очередь, определяется правильным выбором вида прогнозирующей функции, способы подбора которой не формализованы и существенным образом зависят от интуиции прогнозиста. Кроме того, применимость экстраполяционных прогнозов, так же как и прогнозов, основанных на стохастическом подходе, строго ограничена рассматриваемой коррозионной системой. Поэтому на основании полученных результа-

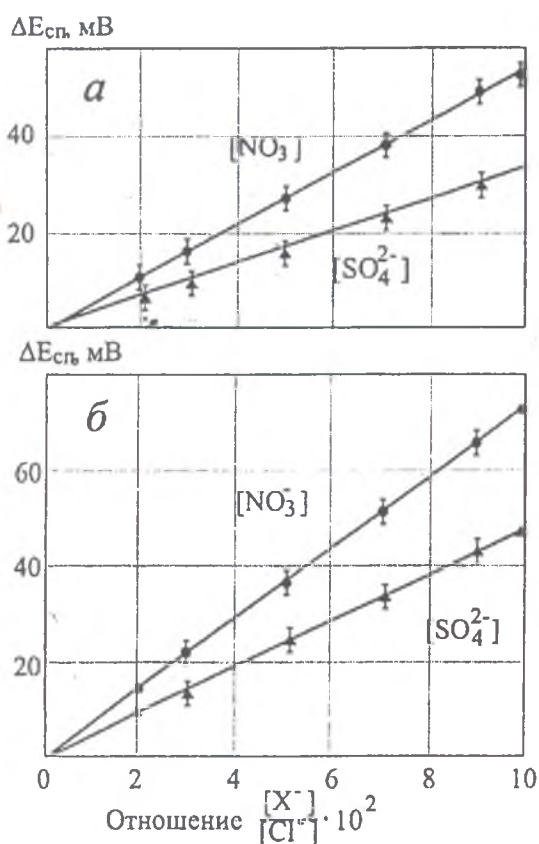


Рис. 3. Влияние соотношения концентрации ингибирующих ионов  $[X^-]$  и хлоридов  $[Cl^-]$  на потенциал образования солевой пленки в растворах с содержанием хлоридов от 0,1 до 1,0 М: а — 293 К; б — 333 К

тов рискованно осуществлять прогнозы для других систем и условий, значительно выходящих за рамки тех, для которых они были определены.

Применение экспертных оценок при прогнозировании питтинговой коррозии ограничено как объективными, так и субъективными причинами. К объективным причинам следует отнести сложность процесса питтинговой коррозии, к субъективным — свойства человеческой природы, влияющие на устойчивость и стабильность результатов. Действительно, для питтинговой коррозии характерен наименьший коэффициент конкордации (согласованность мнений специалистов), который равен 0,74, тогда как для других видов коррозии он существенно выше и составляет, например, для атмосферной коррозии 0,95. Экспертная оценка оправдана, когда нет надежной теоретической основы развития объекта, и с накоплением необходимых знаний в конкретной области необходимость экспертных оценок отпадает.

Математические модели, основанные на детерминированном подходе, — единственный тип моделей, дающий и понимание природы питтинговой коррозии и являющийся мощным прогностическим средством. К сожалению, математические модели, учитывающие совместно диффузию, миграцию, конвекцию и электрохимические реак-

ции, сложны для решения даже для ламинарных потоков жидкости и практически не решаемы для турбулентных потоков. Поэтому в преобладающем числе известных детерминированных моделей питтинговой коррозии перенос ионов учитывается только за счет либо миграции, либо диффузии, либо конвекции [21]. Наиболее полными являются модели [22], позволяющие при определенных допущениях оценивать роль различных транспортных процессов и поверхностных реакций при пит-

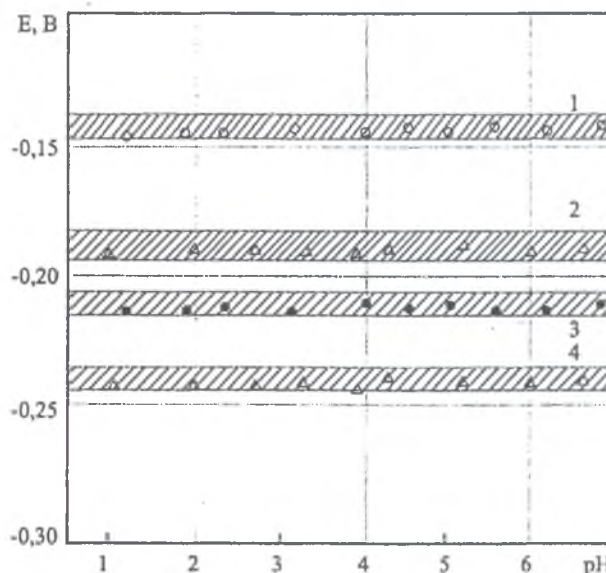


Рис. 4. Влияние pH на величину потенциала образования солевой пленки на стали 12X18H10T в растворах хлоридов при  $T = 298$  К (1, 3) и  $T = 343$  К (2, 4): 1, 3 — 0,1 М NaCl; 2, 4 — 3,0 М NaCl

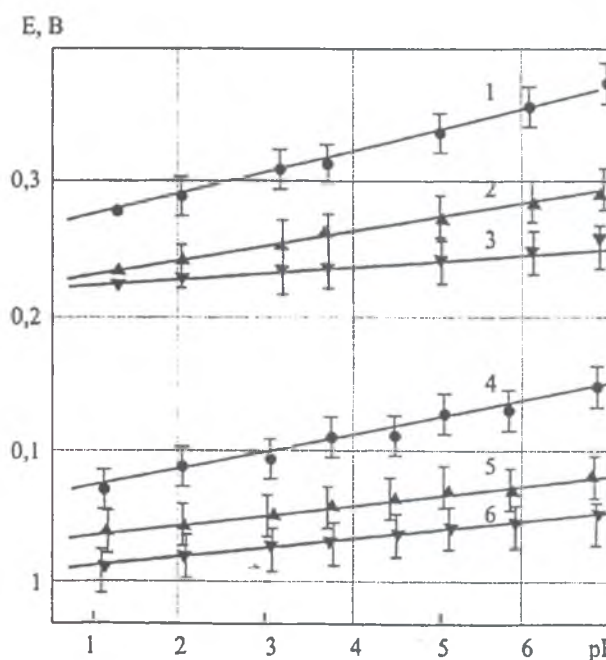
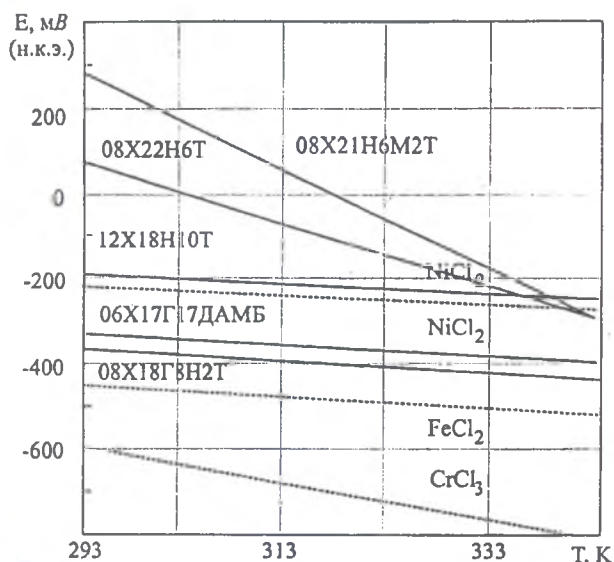


Рис. 5. Влияние pH на величины потенциалов питтингообразования (1, 4), минимального гальваностатического потенциала питтинговой коррозии (2, 5), потенциала репассивации (3, 6) стали 12X18H10T в растворах хлоридов,  $T = 298$  К: 1, 2, 3 — 0,1 М NaCl; 4, 5, 6 — 3,0 М NaCl



6. Зависимость потенциалов образования солевых пленок различных сталей и термодинамических потенциалов образования  $FeCl_2$ ,  $NiCl_2$ ,  $CrCl_3$  в 1 М NaCl от температуры

тингообразовании и определять условия пассивации питтингов за счет возникающих в них вторичных течений.

Поэтому в основу математической модели прогнозирования питтингостойкости нержавеющей сталей в движущихся хлоридсодержащих средах нами был заложен детерминированный подход и следующие представления.

Эффект влияния движения среды на кинетику роста питтинга определяется массопереносом через солевую пленку (резистивный слой) или же (при его отсутствии) проявляется в разбавлении внутрипиттингового электролита. При определенной скорости движения жидкости ( $Re_{кр}$ ) на поверхности металла создаются такие условия, при которых концентрация насыщения  $C_{нас}$  не достигается, и сохраняется возможность самопроизвольной пассивации обнажившихся участков поверхности.

$Re_{кр}$  определяется решением уравнения Тафеля (1) и конвективного массопереноса (2) для реакций, идущих с кинетическим контролем:

$$\eta_s(x) = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i(x)}{i_0}; \quad (1)$$

$$U \nabla C = \frac{i}{Pe} \nabla^2 C, \quad (2)$$

и уравнениями Лапласа (3) и конвективного массопереноса (2) для реакций, идущих с омическим контролем:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Возможность пассивации уже функционирующих питтингов определяется интенсивностью вто-

ричных движений в кавернах, когда при определенных размерах питтинга создаются условия для растворения солевой пленки на его поверхности и вымывания или выноса продуктов растворения из питтинга. В данном случае условия пассивации питтинга можно определить из решений уравнения Навье-Стокса:

$$\nabla^2 U = Re \nabla P \quad (4)$$

и конвективного массопереноса (2), с двумя видами граничных условий.

1. Поверхность каверны растворяется с определенной скоростью, т. е.  $\frac{\partial C}{\partial n} = -Sh$ ,  $C < C_{нас}$ ;  $C_{нас} = C_{кр}$ .

2. Поверхность каверны покрыта солью металла, т. е.  $C > C_{кр}$ .

Решение уравнений (1) и (2), (3) и (2) или (4) и (2) представляют в виде критических значений числа Рейнольдса:

$$Re_{кр} > A Sc^b Sh^c. \quad (5)$$

При потенциалах отрицательнее потенциала образования солевой пленки критическая концентрация катионов металла не достигается, поскольку в этой области потенциалов имеются кинетические ограничения процесса растворения металла в питтинге. В области потенциалов положительнее потенциала образования солевой пленки растворение металла в стабильно функционирующем питтинге происходит с диффузионно-омическим

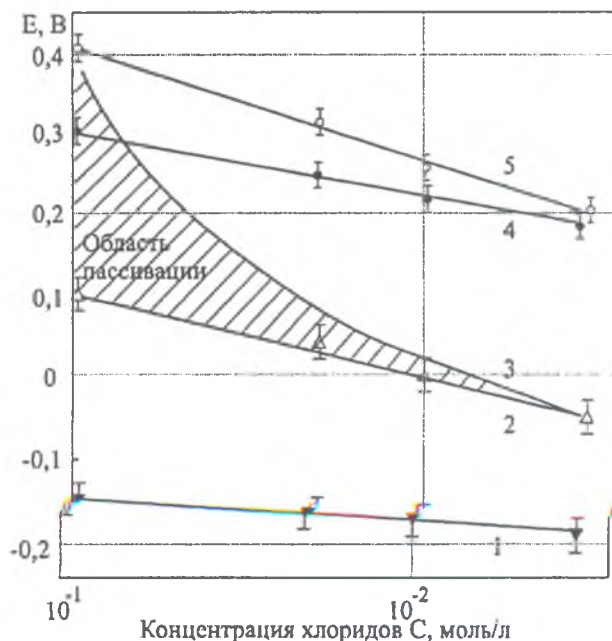


Рис. 7. Критические потенциалы стали 12X18H10T и область пассивации питтингов (2, 3) в движущейся среде в растворах хлоридов:

1, 2 —  $E_{сп}$ , соответственно при  $\omega = 0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ ; 4, 5 —  $E_{по}$ , соответственно при  $\omega = 0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ ; 3 — расчетная зависимость

контролем. В этом случае, условно приняв за потенциал дна питтинга потенциал образования солевой пленки  $E_{sf}$  и зная омические характеристики системы, можно рассчитать область потенциалов  $\Delta E = E_{кор} - E_{sf}$ , в которой возможна пассивация питтингов.

Проверка математической модели на физической модели питтинга (полностью активированном электроде в гидродинамической системе двух дисков) и в реальной коррозионной системе на различных марках стали в условиях работы промышленных аппаратов подтвердили ее справедливость [7, 23, 24].

Апробация предложенного подхода для оценки питтингостойкости нержавеющих сталей, используемых при аппаратном оформлении процессов синтеза антибиотиков в условиях производства МУП ПНИТИА, Пензенского комбината "Биосинтез", Курганского комбината "Синтез" и Красноярского завода медицинских препаратов, показала его высокую надежность.

Использование методики прогнозирования питтингостойкости нержавеющих сталей позволило уточнить гидродинамические режимы эксплуатации оборудования химико-фармацевтических производств, повысить безопасность технологических процессов и улучшить качество лекарственных средств. Это подтверждает возможность использования предлагаемого подхода к прогнозированию питтинговой коррозии нержавеющих сталей в движущихся средах как для оценки вероятных коррозионных повреждений на действующем оборудовании, так и для оптимизации условий эксплуатации оборудования на стадии разработки технологической и конструкторской документации.

На основе полученных данных с помощью СУБД Access 2000 была разработана автоматизированная система выбора коррозионно-стойких материалов АСВКСМ для сред и условий проведения технологических процессов химико-фармацевтической промышленности [25–28].

Таким образом, разработанные научные и инженерные основы оценки питтингостойкости нержавеющих сталей и полученные данные позволили сделать еще один шаг на пути к решению коррозионных проблем в химико-фармацевтической промышленности и созданию экспертных систем по коррозии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Натрадзе А. Г., Лозовик Т. Я. Защита от коррозии в производстве химико-фармацевтических препаратов. М.: Медицина, 1971. 304 с.
2. Листов С. А., Петров Н. В., Арзамасцев А. П., Стуловский С. С. Изучение содержания примесей тяжелых металлов в лекарственных средствах // Хим.-фармацевт. журн. 1990. Т. 24. № 9. С. 75–77.
3. Лев В. З., Таранцева К. Р., Филиппов Е. В. Электрохимическое исследование коррозионностойких материалов в процессе химического синтеза 2-(2-аминогидрокси)метоксиминоуксусной кислоты (2-АТМУК) // В кн.: "Успехи в области изучения и производства антибиотиков". М.: ВНИИА, 1991. С. 103–112.
4. Таранцева К. Р., Лев В. З., Филиппов Е. В. Электрохимическое исследование коррозионностойких материалов в процессе химического синтеза сульфоксид бензилпенициллина // Там же. С. 113–117.
5. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Оценка питтингостойкости нержавеющих сталей в хлоридсодержащих средах химико-фармацевтических производств // Защита металлов. 2004. Т. 40. № 5. С. 1–9.
6. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Коррозионная стойкость нержавеющих сталей в процессе синтеза калиевой соли гидроксиминоацетоуксусного эфира // Коррозия: материалы и защита. 2005. № 7. С. 9–12.
7. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Коррозионная стойкость нержавеющих сталей в процессе химического синтеза сульфоксида бензилпенициллина // Коррозия: материалы и защита. 2005. № 5. С. 17–22.
8. Зелинский Ю. Г., Шеремьянкин Б. В., Шмаков Н. М. Выделение и очистка веществ в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина, 1982. 240 с.
9. Trethewey K. R. and Roberge P. R. In: Modelling aqueous corrosion. Eds. 27. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 1994. P. 129.
10. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Применение системы двух дисков для исследования питтинговой коррозии сталей в движущихся хлоридсодержащих средах // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 1997 № 4. С. 74–76.
11. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Исследование влияния движения среды на массоперенос в питтингах в гидродинамической системе двух дисков // Защита металлов. 2001. Т. 37. № 6. С. 624–629.
12. Таранцева К. Р., Крючкова О. А., Логвин А. М. Методика оценивания многопараметрических зависимостей при исследовании коррозионных процессов // Междунар. науч. конф. "Динамика процессов в природе, обществе и технике — информационные аспекты". Таганрог: ТПУ, 2003. Т. 2. С. 66–70.
13. Таранцева К. Р. Комплексная оценка питтингостойкости оборудования и сооружений // 7 Всерос. науч.-практ. конф. "Техносферная безопасность". Ростов-на-Дону: РГУП, 2002. С. 119–122.
14. Таранцева К. Р., Крючкова О. А. Определение многопараметрических зависимостей при исследовании питтинговой коррозии // XVI Междунар. науч. конф. "Математические методы в технике и технологиях". Ростов-на-Дону: РГУ, 2003. Т. 8. С. 126–129.
15. Бувач Ю. А., Манкевич В. Н., Пахомов В. С. Конвективная диффузия в системе вращающегося и неподвижного дисков // ДАН СССР. 1986. Т. 289. № 6. С. 1404–1407.
16. Hunkeler F., Frankel G. S., Bohni H. On the mechanism of localized corrosion // Corrosion (NACE). 1987. V. 43. N 3. P. 189–191.
17. Новаковский В. М., Сорокина А. Н. Сравнительная электрохимия коррозионного растрескивания и питтинга нержавеющей стали в хлоридных растворах // Защита металлов. 1966. Т. 2. № 4. С. 416–424.
18. Таранцева К. Р., Пахомов В. С., Богатков Л. Г. Прогнозирование питтинговой коррозии по потенциалу образования солевой пленки // Защита металлов. 1994. Т. 30. № 4. С. 377.
19. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Влияние движения среды и температуры на потенциал образования солевой пленки // Защита металлов. 1999. Т. 35. № 2. С. 162–168.
20. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Влияние состава стали на питтингостойкость // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2003. № 4. С. 38–40.
21. Sharland S. M. A review of the theoretical modeling of crevice and pitting corrosion // Corros. Sci. 1987. V. 27. N 3. P. 289–323.
22. Alkire R., Gangellari A. Formation of salt films during anodic metal dissolution in the presence of fluid flow // J. Electrochem. Soc. 1983. V. 130. N 6. P. 1252–1259.
23. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Инженерная методика оценки питтингостойкости сталей в движущихся средах по потенциалу образования солевой пленки // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2001. № 3. С. 34–37.
24. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Оценка влияния движения среды на пассивацию питтингов и их предельные размеры // Защита металлов. 2002. Т. 38. № 1. С. 57–64.
25. Таранцева К. Р., Каянакина Н. Е. Организация доступа к информации по коррозии металлов в базе данных Microsoft Access // XVI Междунар. науч. конф. "Математические методы в технике и технологиях". Ростов-на-Дону: РГУ, 2003. Т. 8. С. 102–104.
26. Таранцева К. Р., Каянакина Н. Е. Организация потока информации и определение функций справочно-информационной системы по коррозии // Там же. С. 104–105.
27. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Автоматизированная система выбора коррозионно-стойких материалов в химико-фармацевтических производствах // Коррозия, материалы и защита. 2004. № 7. С. 18–22.
28. Таранцева К. Р., Пахомов В. С. Использование современных информационных технологий для решения коррозионных проблем // Коррозия, материалы и защита. 2004. № 6. С. 8–12.