

Чернякевич О.Ю.

## ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТАМАННА ПРИ ОБОСНОВАНИИ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### Введение

В статье обобщены многочисленные экспериментально-теоретические исследования относительно коррозии арматуры при действии газовых сред, в зависимости от вида и концентрации кислоты, конденсирующейся на поверхности и в порах защитного слоя бетона. Представлен расчет глубины коррозионного повреждения бетона по уравнению Таманна при действии газовых сред (которые формируются при действии различных видов и концентраций кислот) для обоснования величины защитного слоя бетона в железобетонных конструкциях подвергающихся газовой коррозии. Настоящая работа связана с исследованием долговечности. Цель работы — рассчитать глубину коррозионного повреждения, используя уравнение Таманна, и сравнить ее с толщиной защитного слоя, назначенного в СНБ 5.03.01-02.

### Состояние проблемы

Строительные нормы и правила постоянно совершенствуются, так как не обеспечивают долговечности железобетонных конструкций при действии на них газовых сред.

Процессы газовой коррозии бетона и железобетона изучается уже давно [1, 2, 3]. Несмотря на то, что проблема изучается достаточно давно, она до сих пор актуальна.

В работе [4] описан механизм газовой коррозии в железобетонных конструкциях коллекторов, вызванной повышенным содержанием сульфидов, сульфатов и органических веществ, которая привела к аварии. Причиной газовой коррозии трубопроводов послужили: состав сточных вод и присутствие в них сульфидов, сульфатов, хрома, марганца, также конструктивные особенности самих трубопроводов.

Еще в 1994 году специалисты НИИЖБ (г. Москва) установили, что в напорных участках коллекторов при отсутствии контакта сточных вод с кислородом воздуха в слизистой пленке на стенках коллектора образуется анаэробная среда, в которой определенный тип бактерий [4] превращает сульфаты в сульфиды. Однако при стыковке напорного участка с самотечным, благодаря появляющейся турбулентности, сульфиды в виде сероводорода, выделяющегося в воздух и на влажных стенках трубы, превращаются с помощью других бактерий в серную кислоту. Серная кислота разъедает бетон, превращает его в гипсовое тело, которое не сможет выдержать тяжесть грунта и разрушается. Концентрация сульфидов на поверхности бетона прямо влияет на глубину проникновения сульфидов в защитный слой бетона.

Проникновение газов в железобетонные конструкции, стимулирует коррозию арматуры, характеризует долговечность бетона – это глубина проникновения сульфидов и условия контакта газа с арматурой. Главные факторы, влияющие на протекание газовой коррозии в железобетонных конструкциях, следующие: отсутствие на поверхности арматуры пленки воды, минимальное содержание влаги, высокая температура, неоднородность в химсоставе арматуры.

Действие на железобетон газовых сред определяется видом и концентрацией кислоты, конденсирующейся на поверхности и в порах защитного слоя бетона. Особенно опасна в этом отношении хлористоводородная (соляная) кислота. Уже небольшие концентрации хлористого водорода создают

условия для миграции хлорид-ионов к поверхности арматуры и коррозии стали в результате ее депассивации. Агрессивное действие распространенных кислых газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$  состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образования в нем соединений, по-разному влияющих на свойства бетона. Углекислый газ в бетоне соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его и обуславливая потерю защитных свойств бетоном поверхностного слоя, что открывает возможность коррозии арматуры. Сернистый газ образует сернистую кислоту, которая сравнительно легко окисляется на воздухе в серную кислоту, происходит сульфатизация бетона, которая ослабляет его защитное действие по отношению к арматуре, т.е. газовая коррозия в основном проявляется в действии на стальную арматуру.

В СНиП 2-03.11-85 условия газовой среды разделены на три группы в зависимости от влажности климата помещений. Газовые среды классифицированы на четыре группы по степени агрессивности в зависимости от вида и концентрации газа. По отношению к бетону агрессивной считается только газовая среда с повышенной концентрацией газов и при высокой влажности, значительно более строгие нормы приведены для железобетона в [5].

Интересные данные о коррозионной стойкости бетона на легких заполнителях, по сравнению с тяжелым бетоном в агрессивной газовой среде – выдерживание над парами соляной кислоты с дополнительной подачей пара [2] показали, что механизм коррозии и зависимость кинетики коррозии от проницаемости (воздухопроницаемости) структуры бетона аналогичны. В условиях опыта было получено уплотнение структуры бетона при пониженной проницаемости и снижение динамического модуля упругости при увеличении воздухопроницаемости [6].

Действующие нормы составлены в расчете на интервал температур от 0 до 50°C. В то же время, как показали последние исследования, температура может существенно повлиять на кинетику коррозионного процесса. Растворимость гидроксида кальция повышается с понижением температуры. Это неизбежно должно привести к смещению равновесия реакции. Экспериментально установлено усиление коррозионного процесса при действии сульфатов при пониженной положительной температуре. Данные, полученные за последние годы [7], позволяют утверждать, что при пониженной положительной температуре, наряду с этtringитом при действии сульфатов на цементный раствор в присутствии растворенной углекислоты образуется и таумазит – карбосульфосиликат кальция ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{CSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot aq$ ) [8, 9]. Эти обстоятельства пока недостаточно исследованы для внесения результатов в нормы, необходимо иметь их в виду при рассмотрении коррозионной стойкости бетона и его долговечности в специальных условиях.

**Расчет глубины коррозионного повреждения, при действии на бетон  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  различных концентраций и обоснование величины защитного слоя бетона, назначенного в СТБ 5.03.01 – 02**

Анализ литературных данных показал, что для процессов коррозии, находящихся в диффузионной области справедливо уравнение Таманна для расчета глубины коррозионного повреждения бетона [7].

*Чернякевич Оксана Юозефовна, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БрГТУ, 220017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

Таблица 1. Коэффициент постоянный для данного состава бетона  $A\bar{b}$ , в зависимости от В/Ц согласно СТБ 1544-2005

Максимальное В/Ц	Газовая коррозия		
	слабоагрессивная	среднеагрессивная	сильноагрессивная
	0,55	0,5	0,45
Коэффициент, $A\bar{b}$	$4,115 \times 10^{-2}$	$3,9248 \times 10^{-2}$	$3,72 \times 10^{-2}$

Таблица 2. Эффективные коэффициенты диффузии для кислот различной концентрации

Кислота	Концентрация, н	Значение pH	Коэффициент диффузии	
			см <sup>2</sup> /с	см <sup>2</sup> /ч
HCl	0.0001-0.1	4-1	1.31	0.047
HNO <sub>3</sub>	0.0001-0.1	4-1	1.25	0.045
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.0001-0.035	4-1.5	1.14	0.041

Таблица 3. Расчет глубины коррозионного повреждения бетона по формуле (1) при действии на него раствора HCl.

$$CaO + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O$$

$$\delta = A\bar{b} \sqrt{D C_0 \Xi t} = 3,72 \cdot 10^{-2} \sqrt{0,047 \cdot 0,00365 \cdot \frac{56}{2 \cdot 36,5} \cdot 20 \cdot 8760} = 0,17 = 1,7 \text{ мм}$$

В/Ц	Концентрация C <sub>0</sub> (HCl)		Коэффициент диффузии D, см <sup>2</sup> /ч при t=20°C	Глубина коррозионного повреждения, мм		
	Степень агрессивного воздействия газовой среды по СНиП 2.03.11-85	Нормальность, н		20 лет	50 лет	100 лет
0,45	слабоагрессивная	0,0005	0,047	0,66	1,1	1,5
			0,047	0,94	1,5	2,1
	среднеагрессивная	0,0001	0,047	1,7	2,8	3,9
			0,047	3	4,7	9,4
	сильноагрессивная	0,01	0,047	9,3	14,8	20,9
			0,047	17,8	28,2	40
0,5	Пиковая агрессивность	0,1	0,047	56	89,3	126
			0,047	0,698	1,1	1,56
	слабоагрессивная	0,0005	0,047	1	1,6	2,21
			0,047	1,9	3	4,2
	среднеагрессивная	0,0001	0,047	3,12	5	10
			0,047	10	15,6	22,1
сильноагрессивная	0,01	0,047	18,8	29,8	42	
		0,047	59,5	94	133,2	
0,55	Пиковая агрессивность	0,1	0,047	0,73	1,2	1,64
			0,047	1,03	1,64	2,3
	слабоагрессивная	0,0005	0,047	1,98	3,1	4,4
			0,047	3,3	5,2	10,34
	среднеагрессивная	0,0001	0,047	10,3	16,3	23,12
			0,047	19,8	31,2	44,2
сильноагрессивная	0,01	0,047	62,4	98,8	139,7	
		0,047	3,65	0,047		

$$\delta = A\bar{b} \sqrt{D \cdot C_0 \cdot \Xi \cdot t} \quad (1)$$

Коэффициент, постоянный для данного состава бетона, исходя из уравнения Таманна согласно [7],  $A\bar{b}$ , (м<sup>3</sup> / кг<sup>1/2</sup>) определяется:

$$A\bar{b} = \sqrt{\frac{2 \left( \frac{1}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{B}{\text{Ц} \cdot \rho_{\text{в}}} \right)}{K}} \quad (2)$$

где  $K$  – содержание гидроксида кальция CaO в цементе, доли единицы ( $K=0,6496$  для сульфатостойкого портландцемента из [10], т. к. в условиях газовой коррозии согласно СТБ 1544-2005 применяются сульфатостойкий портландцемент (ССПЦ));

$\text{Ц}$  – расход цемента;

$\rho_{\text{в}}$  – истинная плотность воды  $\rho_{\text{в}}=1000$  кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ц}}$  – истинная плотность цемента,  $\rho_{\text{ц}}=3100$  кг/м<sup>3</sup>;

Следовательно коэффициент  $A\bar{b}$  будет изменяться в зависимости от В/Ц;

$D$  – эффективный коэффициент диффузии агрессивного вещества через слой продуктов коррозии, см<sup>2</sup>/ч;

$\Xi$  – химический эквивалент, представляющий собой соотношение масс оксида кальция и кислоты, вступающих во взаимодействие  $\Xi = m M_{CaO} / n M_{\text{кисл}}$ ;

$m$  и  $n$  – стехиометрические коэффициенты уравнения реакции между кислотой и оксидом кальция;

$M_{CaO}$  и  $M_{\text{кисл}}$  – молекулярные массы оксида кальция и кислоты;

$t$  – время воздействия агрессивной среды на бетон, ч.

Эффективный коэффициент диффузии  $D$  определяется экспериментально.

Согласно СТБ 1544-2005 в железобетонных конструкциях, находящихся в условиях газовой коррозии применяются бетоны со следующими В/Ц, представленными в таблице 1, и коэффициентами, постоянными для данного состава бетона  $A\bar{b}$  на сульфатостойком портландцементе, рассчитанными по формуле (2).

Таблица 4. Расчет глубины коррозионного повреждения бетона по формуле (1) при действии на него раствора HNO<sub>3</sub>

В/Ц	Концентрация Со (HNO <sub>3</sub> )			Коэффициент диффузии D, см <sup>2</sup> /ч при t=20°C	Глубина коррозионного повреждения, мм		
	Степень агрессивного воздействия газовой среды по СНиП 2.03.11-85	Нормальность, н	кг/м <sup>3</sup> (г/л)		20 лет	50 лет	100 лет
0,45	слабоагрессивная	0,0001	0,001	0,045	0,4	1,1	1,6
			0,0063	0,045	1,7	2,8	3,9
	среднеагрессивная	0,001	0,01	0,045	2,2	3,5	4,9
			0,063	0,045	5,5	8,7	12,3
	Пиковая агрессивность	0,01	0,1	0,045	7	11	15,6
			0,63	0,045	17,4	27,6	39
0,1	6,3	0,045	55,2	87,4	123,6		
0,5	слабоагрессивная	0,0001	0,001	0,045	0,61	1,2	1,64
			0,0063	0,045	1,84	2,9	4,1
	среднеагрессивная	0,001	0,01	0,045	2,32	3,7	5,2
			0,063	0,045	5,8	9,2	13
	Пиковая агрессивность	0,01	0,1	0,045	7,4	11,62	16,4
			0,63	0,045	18,4	29,2	41,2
0,1	6,3	0,045	58,3	92,2	130,4		
0,55	слабоагрессивная	0,0001	0,001	0,045	0,644	1,22	1,72
			0,0063	0,045	1,93	3	4,3
	среднеагрессивная	0,001	0,01	0,045	2,44	3,9	5,5
			0,063	0,045	6,1	9,67	13,7
	Пиковая агрессивность	0,01	0,1	0,045	7,7	12,2	17,2
			0,63	0,045	19,3	30,6	43,23
0,1	6,3	0,045	61,13	96,6	136,7		

Таблица 5. Расчет глубины коррозионного повреждения бетона по формуле (1) при действии на него раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

В/Ц	Концентрация Со (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )			Коэффициент диффузии D, см <sup>2</sup> /ч при t=20°C	Глубина коррозионного повреждения, мм		
	Степень агрессивного воздействия газовой среды по СНиП 2.03.11-85	Нормальность, н	кг/м <sup>3</sup> (г/л)		20 лет	50 лет	100 лет
0,45	слабоагрессивная	0,0001	0,001	0,041	0,75	1,2	1,7
			0,005	0,041	1,7	2,7	3,8
	среднеагрессивная	0,001	0,0098	0,041	2,4	3,73	5,3
			0,01	0,041	2,4	3,8	5,33
	Пиковая агрессивность	0,01	0,098	0,041	7,4	11,8	16,7
			0,035	0,041	23,5	37,3	52,7
0,035	3,43	0,041	44,14	69,8	98,7		
0,5	слабоагрессивная	0,0001	0,001	0,041	0,8	1,3	1,8
			0,005	0,041	1,8	2,8	4
	среднеагрессивная	0,001	0,0098	0,041	2,49	3,93	5,57
			0,01	0,041	2,51	4	5,63
	Пиковая агрессивность	0,01	0,098	0,041	7,87	12,4	17,6
			0,035	0,041	18,4	29,2	41,2
0,035	3,43	0,041	46,6	73,6	104,1		
0,55	слабоагрессивная	0,0001	0,001	0,041	8,34	1,32	1,9
			0,005	0,041	1,9	2,9	4,2
	среднеагрессивная	0,0001	0,0098	0,041	2,6	4,12	5,8
			0,01	0,041	2,64	4,2	5,9
	Пиковая агрессивность	0,01	0,098	0,041	8,3	13	18,5
			0,035	0,041	26,1	41,3	58,4
0,035	3,42	0,041	49	77,2	109,2		

По данным работы [11], эффективные коэффициенты диффузии *D* приведены в табл.2 для температуры 20°C. Для фактической температуры эксплуатации приближенно принимаем, что увеличение или уменьшение температуры на 1°C дает соответственно увеличение или уменьшение *D* на 2,6 % по [7].

Расчет глубины коррозионного повреждения бетона производился при различной степени агрессивного воздействия газовой среды: слабоагрессивном, среднеагрессивном, сильноагрессивном и также при пиковой агрессивности газовой среды, т.к. действие на железобетон газовых сред определяется видом и концентрацией кислоты, конденсирующейся на

поверхности и в порах защитного слоя бетона, расчет выполнялся при различных концентрациях кислот, в данной работе HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, при максимальных В/Ц бетона на сульфатостойком порландцементе согласно СТБ 1544-2005, при температуре 20°C, при воздействии агрессивной газовой среды в течение 20, 50, 100 лет.

Анализ результатов расчета глубины коррозионного повреждения, приведенных в таблицах 3, 4, 5 по уравнению Таманна, показал, что минимально допустимые толщины защитного слоя бетона, приведенные в СНБ 5.03.01-02, обеспечивают защиту арматуры ЖБК от газовой коррозии даже в

сильноагрессивной среде. Расчетная глубина коррозионного повреждения по уравнению Таманна значительно меньше толщины защитного слоя приведенной в СНБ 5.03.01-02.

Необходимо отметить, что уравнение Таманна не учитывает неоднородность в составе арматуры, конструкционные особенности железобетонных конструкций (особенно трубопроводов), что приводит к увеличению скорости газовой коррозии. Также к ускорению коррозионных процессов и естественно увеличению глубины коррозионного повреждения приводит понижение положительной температуры при действии сульфатов, что не учитывается в уравнении Таманна.

Используя уравнения Таманна, можно установить необходимость и эффективность применения защитных изоляционных мероприятий, сопоставляя глубину расчетного разрушения поверхностного слоя бетона (принимая погрешность расчетов по уравнению Таманна равную 5мм) с минимальной толщиной защитного слоя бетона по СНБ 5.03.01-02, которая сохраняет его защитные функции (эксплуатационную пригодность) конструкции.

Можно установить необходимость возможного ремонта конструкции. От защиты поверхности (вторичной защиты) можно отказаться, если расчетная толщина (плюс погрешность 5мм) разрушения поверхностного слоя бетона за проектный срок (или срок до капитального ремонта) эксплуатации не приводит к долговечности конструкции.

Приведенные в этой работе расчеты показывают, что применение бетонов на сульфатостойких портландцементе пониженной проницаемости (с минимальным В/Ц) позволяет отказаться от вторичной защиты бетона в газовых средах.

#### ВЫВОДЫ

1. Главными факторами, определяющими газовую коррозию арматурной стали в железобетонных конструкциях является минимальное содержание влаги и температура. Необходимо учитывать при рассмотрении коррозионной стойкости бетона и его долговечности, что при понижении температуры наряду с этtringитом при действии сульфатов на цементный раствор в присутствии растворимой углекислоты образуется туамзит (карбосульфосиликат кальция), который вызывает разрушение цементного камня.
2. Толщины защитного слоя, назначенные по СНБ 5.03.01-02, обеспечивают защиту арматуры железобетонных конструкций от газовой коррозии, что подтверждают расчеты

глубины коррозионного повреждения по уравнению Таманна.

3. Расчет глубины коррозионного повреждения защитного слоя бетона с использованием уравнения Таманна позволяет определить необходимость использования вторичной защиты и периодичность проведения ремонтных работ.
4. Увеличение долговечности железобетонных конструкций, работающих в условиях агрессивной газовой среды, можно достичь не только за счет большого размера защитного слоя бетона, но и используя бетон на сульфатостойком портландцементе с пониженной величиной В/Ц.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. Москвин В.М., Нерсисян В.Г. Влияние напряженного состояния на коррозию легкого бетона в агрессивной газовой среде // Бетон и железобетон, 1970.
3. Москвин В.М., Рубецкая Т.В., Любарская Г.В. Коррозия бетона в кислых средах и методы исследования // Бетон и железобетон, 1971. – № 10 – С. 17-19.
4. [www.enwl.net.ru/2002/chemestr/04094545/PHP](http://www.enwl.net.ru/2002/chemestr/04094545/PHP)
5. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1986. – С. 3-27.
6. Яковлев В.В., Головачева Т.С., Щуркова Т.А. Исследование процесса выщелачивания цементного камня // Строительные материалы и конструкции. – Уфа: НИИПромстрой, 1985.
7. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шиссель П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М.: Стройиздат, 1990. – 247с.
8. Ludwig U., Merhrs S. destruction of historical buldings by formation of ettringite or thaumasite. 8 Int. congr. On the Chemistry of cement, 1986. – pp.181-188.
9. Ostrowski Cz. Baclanie mineralogiczke tlock. Cement, Wapno, Gips, 1987.
10. [www.vc.tenir.com/catalog.html](http://www.vc.tenir.com/catalog.html).
11. Рубецкая Т.В., Бубнова Л.С., Любарская Г.В. Расчет и прогнозирование глубины коррозии бетона при действии на него жидких агрессивных сред//Сб. тр./НИИЖБ. – М., 1975. – Вып. 19 – Повышение коррозионной стойкости бетона и ЖБК. – С. 11-16.

Статья поступила в редакцию 23.10.06

УДК 624.04.681

Уласевич В.П., Костюк О.В.

## ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ ГИБКИЙ СТЕРЖЕНЬ КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ В РАСЧЕТАХ ГИБКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Краткая характеристика расчета по МКЭ. Идея метода конечных элементов (МКЭ) получила свое развитие применительно дискретному решению континуальных задач в виде пластин и оболочек в 70-х годах прошлого столетия, когда началось широкое применение ЭВМ в решении задач строительной механики, позволившее эффективно использовать матричные операции вычислительной математики.

В расчетах стержневых систем наибольшее применение МКЭ получил в форме метода перемещений (деформаций).

Основное отличие от классического метода перемещений состоит в учете влияния на перемещение узловых точек не только изгибных, но и продольных деформаций. Это отличие, с одной стороны, позволяет в большей степени формализовать выбор основной системы МКЭ, а с другой стороны – повысить точность расчета.

1.1. Расчет в линейной постановке. В линейной постановке основные положения МКЭ стержневых систем изложены в [1, 2]. Суть МКЭ для стержневых систем:

Уласевич Вячеслав Прокофьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Костюк Ольга Васильевна, младший научный сотрудник НИЧ Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.