

УДК 624.21.01.07

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ХЛОРИДОВ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ В БЕТОН

Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.<sup>1)</sup>, инж. ПРАСОЛ А. В.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup> Белорусский государственный университет транспорта

Состояние окружающей среды вдоль автомобильных дорог в значительной мере зависит от воздействия солей-антиобледенителей. Кроме того, в ряду загрязнителей – выхлопные газы транспортных средств, содержащие углекислый газ, изменяющие рН воды на поверхности дороги [1] и увеличивающие скорость насыщения бетона углекислотой, особенно в тоннелях.

В ходе исследования выявлена зависимость между воздействием антиобледенителей и увеличением концентрации хлоридов в свободной воде на поверхности дороги и поверхностной концентрации хлора в бетоне (рис. 1).

**Перенос и распространение антиобледенителей.** Антиобледенительные соли распространяются от дорожной поверхности четырьмя основными транспортными процессами [1, 2]: дренажом, расчисткой, брызгами, аэрозолями.

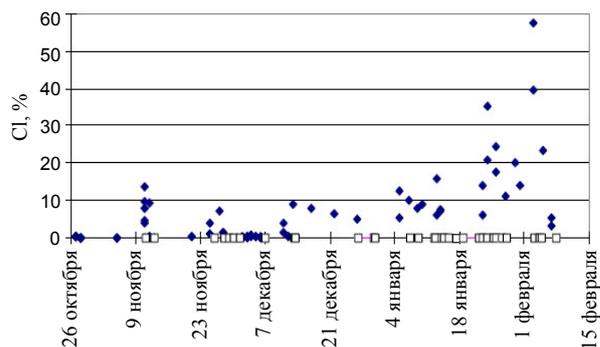


Рис. 1. Содержание хлора в свободной воде на горизонтальной бетонной поверхности:  
♦ – время применения антиобледенителей [1]

В [3, 4] изучалось распространение антиобледенительных солей в стороны от дороги как функция скорости и расстояния до дороги. На рис. 2 показано их распространение при различных скоростях (50, 60, 70, 80, 100 км/ч).

Концентрация соли на обочине дороги (расстояние – 0) равна 100 %.

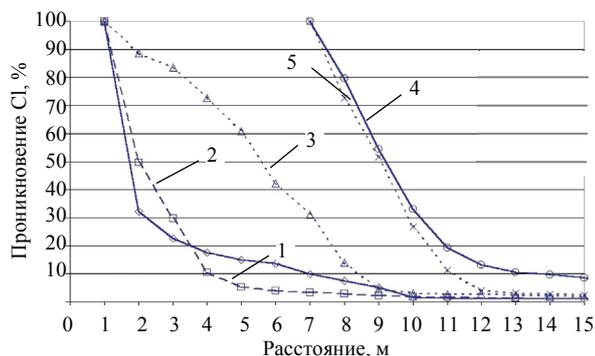


Рис. 2. Размер зоны, подвергающейся воздействию брызг от движения, выраженный как функция скорости [4]: 1 – 50 км/ч; 2 – 60; 3 – 70; 4 – 80; 5 – 100 км/ч

Из рис. 2 видно, что при низких скоростях (<60 км/ч) свыше 90 % соли осаждается в пределах 4 м от дороги. Однако при скоростях выше 60 км/ч соль транспортируется на большие расстояния от дороги. Отметим, что образцы при скорости выше 70 км/ч были взяты на расстоянии не менее 7 м от дороги.

**Воздействие на конструкции.** Главными источниками воздействия хлоридов на железобетонные автомобильные мосты [5] являются утечка хлоридов через стык, крупные и мелкие брызги от движения.

В [5, 6] изучалось совместное разрушающее влияние крупных и мелких брызг на шоссе. Для определения содержания хлора соленая вода собиралась на различной высоте над поверхностью дороги. Результаты исследований представлены на рис. 3.

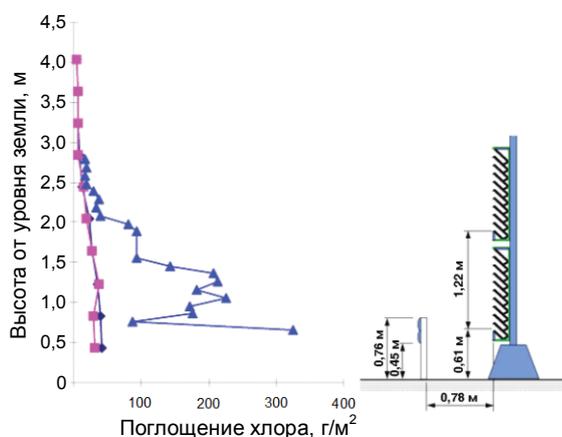


Рис. 3. Воздействие хлора на вертикальную поверхность [5, 6]: ◆ – весна 2006 г.; ■ – октябрь 2006 г.; ▲ – ноябрь 2006 г.

Для исследования зависимости проникновения хлора во времени [7] образцы раствора [8] подвергались воздействию хлоридов в течение пяти сезонов. Некоторые из полученных данных представлены на рис. 4. Проникновение хлоридов в образцы раствора изучали в течение трех различных временных периодов воздействия: одной зимы, одного года (зима + лето) и пяти лет (пять лет + половина лета).

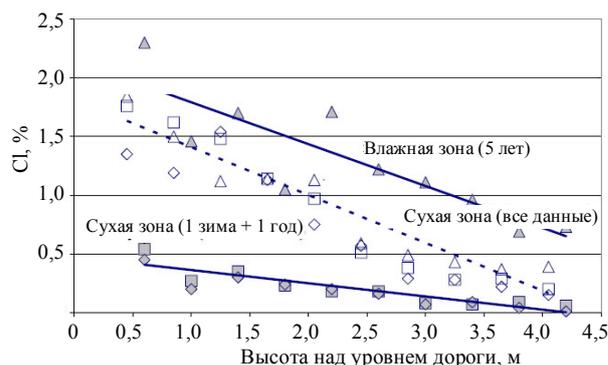


Рис. 4. Общее количество хлоридов, поглощенных образцами раствора в различное время воздействия [7]: □ – влажная зона одной зимы; ◇ – то же одного года; △ – то же пяти лет; ■ – сухая зона одной зимы; ◆ – то же одного года; ▲ – то же пяти лет

Зафиксировано различие в проникновении хлора в сухих и влажных зонах (рис. 4). Выявлена зависимость проникновения хлора от высоты. Исследования образцов раствора во влажной зоне свидетельствуют о том, что увеличения количества проникающих хлоридов не произошло и максимальная концентрация хлора не увеличилась. Однако глубина, на которой наблюдается максимальная концентрация хлора, со временем увеличилась, т. е. хлориды проникли в образцы. Напротив, образцы раствора в сухой зоне свидетельствуют об увеличении концентрации хлора со временем [9].

**Сухая окружающая среда.** Воздействие хлоридов в сухой окружающей среде у дорог в основном происходит в виде крупных и мелких брызг (аэрозоли), возникающих в процессе движения транспорта. Антиобледенители распространяются вечером или рано утром, поэтому наиболее подвержены воздействию хлора поверхности, расположенные рядом с полосами с самым интенсивным движением в утренние часы. Однако не всегда наблюдается картина, описанная в [10–12]. Сильное воздействие хлора было обнаружено и на поверхностях, распо-

ложенных напротив полос с интенсивным утренним движением, или на подветренной стороне. Проникновение хлора на конструкции моста показано на рис. 5 [11]. Для поверхностей дорог, ориентированных по направлению движения из города (кривая с индексом *S*), характерны высокие скорости утром, для поверхностей дорог по направлению движения к городу (кривые с индексом *N*) – низкие. Кривые, построенные по ромбам, должны сравниваться, так как они получены на той же самой высоте (1,3 м), но в различных направлениях. Все данные были получены в мае, т. е. только после сезона применения антиобледенителей.

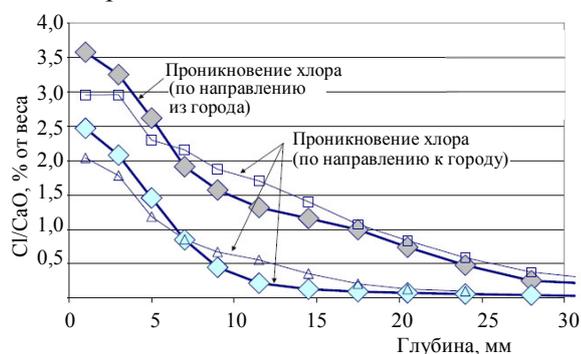


Рис. 5. Проникновение хлора измерялось на двух противоположных сторонах колонны [11]: —◆— *S* – 1,3 м; —□— *3N* – 0,25 м; —◆— *N1* – 1,3 м; —△— *4N* – 1,9 м

Уровень проникновения хлора в бетонные поверхности дорог, ориентированных по направлению движения из города (индекс *S*), значительно выше уровня проникновения в бетонные поверхности дорог по направлению движения к городу (индекс *N*) (рис. 5). Это можно объяснить тем, что скорости транспорта в полосах с наиболее интенсивным движением утром низки (пригородное движение к городу) из-за пробок. При этом образуется небольшое количество крупных и мелких брызг, в результате чего снижается проникновение хлора в бетонные поверхности, ориентированные по направлению этого движения. Однако в бетонных поверхностях в противоположном направлении

с высокими скоростями транспорта, но меньшим количеством движения проникновение хлора в бетон значительно выше.

Хлориды могут также осаждаться на подветренной стороне, например колонн, где их

невозможно смыть, поскольку поверхность защищена от дождя.

**Влажность дорог и окружающей среды.** Воздействие хлоридов на поверхности железобетонных конструкций во влажных средах происходит как комбинация воздействия загрязненной солью слякоти, крупных и мелких брызг. Растворы соли на горизонтальной поверхности (крайние железобетонные балки) приводят к интенсивному воздействию хлора. Кроме того, поверхности железобетонных конструкций во влажной среде часто довольно близки к шоссе (особенно в вертикальном направлении), т. е. влажные части конструкции часто подвергаются самому интенсивному воздействию хлора. С другой стороны, поверхности железобетонных конструкций также подвергаются непосредственному воздействию дождя, т. е. хлориды могут быть смыты. Это видно по форме кривых проникновения хлора. Следует сравнивать кривые для сухой и влажной окружающей среды дорог на одних и тех же мостах (рис. 6). Максимальное содержание хлора на графике заштриховано серым цветом. Данные получены в ноябре–декабре, т. е. в начале сезона применения антиобледенителей.

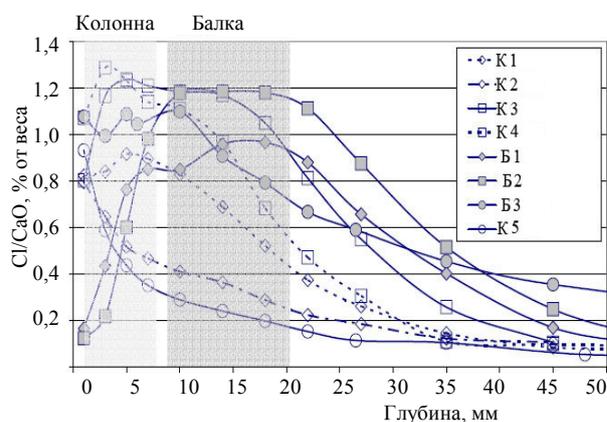


Рис. 6. Результаты измерений проникновения хлора в колонны и балки: К – колонны; Б – балки [12]

Как следует из рис. 6, максимальное содержание хлора – на глубине 1–8 мм (колонны) и 9–20 мм (балки). Кроме того, во внешних частях кривой для балок моста 978 содержание хлора быстро уменьшается. Это свидетельствует о том, что вымывание хлоридов с поверхности больше в балках, чем в колоннах. Макси-

мальное содержание хлора на большой глубине указывает на более интенсивное его воздействие в результате образования раствора соли на горизонтальных поверхностях.

В [9] также исследовалась зависимость проникновения хлора от высоты. Результаты анализа показали, что начиная с высоты приблизительно 3 м воздействие хлора уменьшается до ступенчатого уровня (рис. 7).



Рис. 7. Зависимость глубины проникновения хлора от высоты вблизи дороги [9]

**Модели внешних воздействий на железобетон с учетом дорожных условий.** Определим количественно влияние на дорожные условия расстояния, высоты и ориентации до источника хлоридов, главным образом антиобледенителей. Это влияние описано с помощью некоррелированных параметров  $k_{C,d}$ ,  $k_{C,h}$  и  $k_{C,o}$ .

Определение количества параметров  $k_{C,d}$ ,  $k_{C,h}$  и  $k_{C,o}$  производится только на основании характеристик движения и конструкций (главным образом ориентация поверхности).

Параметр  $k_{C,h}$  выражен линейной функцией, которая описывает уменьшение  $k_{C,h}$  с увеличением высоты над дорогой:

$$k_{C,h} = 1 - 0,2h, \quad (1)$$

где  $h$  – высота над дорогой, м.

Параметр  $k_{C,d}$  выражен с помощью показательной функции, описывающей уменьшение  $k_{C,d}$  с увеличением расстояния до дороги. Одна-

ко  $k_{C,d}$  зависит не только от расстояния до дороги, но и от интенсивности и скорости движения, которые описаны параметром  $d_0$ , указывающим расстояние от дороги, при котором  $k_{C,d} = 1,0$ :

$$\begin{cases} k_{C,d} = 1, & d \leq d_0; \\ k_{C,d} = e^{-0,24(d-d_0)}, & d_0 \leq d \leq d \quad (k_{C,d} = 0,1), \end{cases} \quad (2)$$

где  $d$  – расстояние от поверхности дороги в горизонтальном направлении, м;  $d_0$  – расстояние, при котором  $k_{C,d} = 1,0$  м.

Расстояние, при котором  $k_{C,d} = 1,0$ , находится из уравнения (2) и обозначается как  $d_0$ . Параметр  $d_0$  может быть выражен как функция скорости и интенсивности движения.

Результаты исследований в дорожных условиях свидетельствуют о том, что есть различие в воздействии хлоридов в зависимости от направления поверхности. Это моделируется посредством параметра  $k_{C,o}$ , который определяется как отношение общего воздействия хлоридов к воздействию хлоридов на поверхностях по направлению к движению.

Очевидно, что направление дороги существенно влияет на проникновение хлоридов в ее поверхность.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены основные методы применения антиобледенителей на бетонных дорогах.
2. Показаны основные пути перемещения хлор-ионов от места их непосредственного применения.
3. Показано проникновение хлор-ионов в бетон в зависимости от скоростей движения транспорта, расстояния от поверхности дороги, расположения железобетонной конструкции по отношению к движению транспорта и ориентации поверхности конструкции в пространстве.
4. Предложена качественная модель внешних воздействий на железобетонные конструкции, находящиеся в дорожных условиях.
5. В результате использования некоррелированных параметров  $k_{C,d}$ ,  $k_{C,h}$  и  $k_{C,o}$  количественно определено влияние на железобетонную конструкцию дорожных условий, расстоя-

ния, высоты и ориентации до источника хлоридов (антиобледенителей).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Andersen, A.** Measurements of Seasonal and Diurnal Variations of Environmental Conditions Surrounding a Heavily Trafficked Bridge Structure / A. Andersen, J. Paulsson // Proceedings International Conference on «Repair of concrete structures – From Theory to Practice in a Marine Environment». – Svolve, 1997. – P. 143–152.

2. **Blomqvist, G.** Impact of De-Icing Salt on Roadside Vegetation / G. Blomqvist // A Literature Review, VTI rapport 427A / Swedish National Road and Transport Research Institute. – Linköping, 1998.

3. **Eliasson, A.** Spridning av vagsalt kring vagar (The spread of de-icing salts around roads): Project work / A. Eliasson // Naturgeografiska institutionen, Goteborgs universitet. – Goteborg, 1996. – 20 p.

4. **McBean, E.** Migration pattern of de-icing salts from roads / E. McBean, S. Al-Nassri // Journal of Environmental Management. – 1987. – Vol. 25. – P. 231–238.

5. **Wallbank, E. J. H.** The performance of concrete in bridges / E. J. H. Wallbank // A survey of 200 highway bridges, HSMO publication, prepared for the Department of Transport. – London, 1989.

6. **Tang, L.** Measurement of chloride flow along highway / L. Tang, P. Utgenannt // Proceedings of the 2nd International Conference on concrete under severe conditions. – Svolve, 1998.

7. **Fagerlund, G.** Kartering av kloridbelastning vid Riksvag 40 – Resultat fran 5 vintersasonger (Mapping of the chloride load around a Swedish main road exposed to de-icing salts – Results after 5 winter seasons): Report TVBM-7162 /

G. Fagerlund, J. Svard // Division of Building Materials; Lund Technical University. – Lund, 2001. – 12 p.

8. **Wirje, A.** Kartering av miljolast – Kloridpenetration vid RV 40 (Mapping of environmental load – Chloride penetration at RV40): Report TVBM-7106 / A. Wirje, P. Offrell // Division of Building Materials; Lund Institute of Technology. – Lund, 1996.

9. **Weber, D.** Untersuchung von Umwelteinflüssen auf Ingenieur bawerke der Berliner Stadsautobahn (Investigation

of the environmental load on structures in the motorways in Berlin) / D. Weber // BAM 12. – Berlin, Germany, 1982. – No. 2.

10. **Volkwein, A.** Untersuchungen zur Kloridkorrosion der Bewehrung von Autobahn-Brucken aus Stahl- oder Spannbeton (Investigation of chloride induced reinforcement corrosion in highway bridges made of steel or reinforced concrete) / A. Volkwein, H. Dorner, R. Springenschmid; Forschung, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 460. – Berlin, 1986.

11. **Andersen, A.** Investigation of chloride penetration into bridge columns exposed to de-icing salt / A. Andersen // HETEK-report No. 82, Danish Road Directorate. – Copenhagen, 1997. – 37 p.

12. **Lindvall, A.** Chloride ingress data from Danish and Swedish road bridges exposed to splash from de-icing salt / A. Lindvall, A. Andersen, L.-O. Nilsson // Proceedings of 2<sup>nd</sup> International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete. – Paris, 2000. – P. 85–103.

Поступила 20.06.2011