ВІСНИК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
2018р. Серія: Технічні науки Вип. 36
p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

УДК 621.785:669.15-194.2 **doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142551**

© Мірошниченко В.І.[1], Сімкін О.І.[2]

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОДОПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ НА БАЗІ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

На базі раніше розробленої аналітичної моделі предиктивного управління охолодженням металопродукції з застосуванням водоповітряного туману (ВПТ) створено програмне забезпечення для реалізації такої моделі з метою підвищення швидкодії та стабільності управління вторинним охолодженням (ВО) безперервнолитих слябів (БЛС). Виконано імітаційне моделювання процесу ВО БЛС з використанням промислових значень технологічних параметрів процесу безперервного розливання сталі та їх можливих відхилень і показано високу адекватність розробленої аналітичної моделі управління щодо прогнозування наданих траєкторій ВО БЛС. Встановлено зменшення відхилень фактичної температури металу БЛС при застосування розробленої аналітичної моделі не менш ніж вдвічі у порівнянні з умовами діючого виробництва, що засвідчує високу ефективність запропонованого змодельованого підходу до управління ВО БЛС з точки зору забезпечення високих показників якості БЛС та продуктивності роботи МНЛЗ.
Ключові слова: *охолодження водоповітряним туманом, аналітична модель предиктивного управління, вторинне охолодження безперервно-литих слябів.*

Мирошниченко В.И., Симкин А.И. Имитационное моделирование водовоздушного охлаждения металлопродукции на базе аналитической модели предиктивного управления. *С применением ранее предложенной аналитической модели предиктивного управления охлаждением металлопродукции с использованием водовоздушного тумана (ВПТ) разработано программное обеспечение для реализации такой модели с целью повышения быстродействия и стабильности управления вторичным охлаждением (ВО) непрерывно-литых слябов (НЛС). Показана высокая адекватность разработанной модели управления при прогнозировании заданных траекторий ВО НЛС. Установлено уменьшение отклонений фактической температуры слябов не менее чем вдвое по сравнению с неуправляемым ВО НЛС, что свидетельствует о высокой адекватности предложенного смоделированного подхода.*
Ключевые слова: *аналитическая модель предиктивного управления, водовоздушный туман, вторичное охлаждение непрерывно-литых слябов.*

V.I. Miroshnichenko, O.I. Simkin. Computer simulations of the air-mist cooling of steel flat products based on an analytic predictive control model. *A computer software was created to realize the previously developed analytic model for predictive control of the air-mist cooling for a steel flat product. The analytic control model comprises an analytic model of the control object and a novel method for the cooling predictive control. The control object model in turn is based on the previously deduced differential equation analytically defining target time dependence of the water-air volume relation providing meeting the «additivity» rule requirements to the volumes and consumptions of the mixture components. Further, the metal temperature, the heat transfer coefficient, heat fluxes and other cooling process characteristics are determined analytically together with their quantitative relations with the continuous casting technology parameters: casting speed, liquid metal initial temperature etc. High adequacy of the object model was shown by the*

[1] *ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, miroviktoria@gmail.com*
[2] *канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, simkin@ukr.net*

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

metal target cooling trajectory predictions. The predictive control method proposed is based on the on-line temperature and the water-air volume relation measurements with further quantitative predictions of above values for each next time of their measurement with use of the object analytic model. The corresponding target levels of the above parameters in turn are also specified by the same model use. The control action at a time is generated based on comparing the predicted and the target levels of the control parameters for the nearest measurement time. A corresponding computer JavaScript based software was developed. The software was applied to control a simulated air-mist secondary cooling of continuous cast slabs. The real values of the continuous casting technology parameters and their scattering ranges were used as input simulation characteristics. Over twice reduction in simulated slab temperature scattering ranges was obtained by the proposed model application to control the secondary cooling comparing the uncontrolled process. High workability of the proposed control modeling approach was demonstrated.
Keywords: *air-mist cooling, analytic predictive control model, continuous cast slab secondary cooling.*

Постановка проблеми. Застосування водоповітряних сумішей (ВПС) різних типів: вода, що розпилюється під високим тиском, (sprayed water) або водоповітряний туман (ВПТ) (air-mist), є достатньо розповсюдженими методами охолодження сучасної промислової металопродукції [1, 2]. Особливого поширення натепер набуло використання спреєрного розпилення води задля вторинного охолодження (ВО) безперервно-литих слябів (БЛС) у машинах безперервного лиття заготівок (МБЛЗ) [3]. Актуальними проблемами промислового використання водоповітряного охолодження (ВПО) БЛС залишаються:

- розширення діапазонів регулювання швидкості ВО БЛС за рахунок використання не тільки спреєрного охолодження, але і ВПТ;
- підвищення швидкодії та стабільності процесу управління ВО;
- забезпечення предиктивного характеру процесу управління ВО БЛС.

Ключовим напрямком вирішення цих проблем є вдосконалення АСУ ТП ВО БЛС. На теперішній час розроблено та використовується декілька різновидів моделей управління ВО БЛС [4], спільними особливостями яких є:

- застосування в якості математичної моделі процесу тепловідведення системи диференційних рівнянь математичної теорії теплопровідності;
- обов'язкове використання додаткових емпіричних співвідношень між теплофізичними характеристиками процесу ВО та параметрами технології розливання сталі, задля адаптації загальної теорії до специфічних умов виробництва.

При використанні ВПТ під час ВО БЛС, застосування існуючих моделей потребує, в принципі, аналізу теплопередавання від металу до кожного з компонентів суміші «вода-повітря» в умовах невизначених процесів фізичної та теплової взаємодії повітря з краплями води [5]. За цих обставин значно ускладнюється та уповільнюється процес управління ВО. Вочевидь, аналогічним чином на ефективність вказаного процесу впливає також використання згаданих вище емпіричних співвідношень. Окрім викладеного, з одного боку, моделі управління ВО БЛС, які використовуються натепер, не забезпечують його предиктивний характер, а з іншого боку – існуючи моделі предиктивного управління є високоефективними при аналізі стаціонарних процесів та таких, що мають повільний розвиток [6], що не відповідає реальним промисловим умовам ВПО металопродукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основою розробленої аналітичної моделі управління є єдине базове диференційне рівняння (аналітична модель об'єкту управління), яке визначає таку часову залежність коефіцієнту об'ємної частки води $\beta(\tau)$, що забезпечує повне дотримання співвідношень адитивності між об'ємами: V_w, V_a та витратами Q_w, Q_a, відповідно, води та повітря під час ВПО [7] в залежності від геометричних розмірів заготівки; початкового та кінцевого значень температури металу; швидкості безперервного розливання сталі, теплотехнічних характеристик охолоджуючих середовищ та ін. На практиці використання вказаного рівняння надає можливість запобігати розвитку нелінійних явищ під час ВПО, утворенню надлишку або дефіциту кожного з компонентів ВПТ, що створює підґрунтя для забезпечення високої стабільності та якості процесу ВО БЛС. Дослідження показали високу адекватність розроб-

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

леної аналітичної моделі ВО БЛС з застосуванням ВПТ як відносно існуючих типових експериментальних даних щодо температури металу в зоні ВО промислових МБЛЗ, так і у порівнянні з результатами відповідних розрахунків з використанням існуючих моделей ВО БЛС [8, 9].

Мета роботи – розробити програмне забезпечення для реалізації раніше розробленої аналітичної моделі управління водоповітряним охолодженням металопродукції [7, 8], що забезпечує високі стабільність та швидкодію, а також предиктивний характер процесу управління ВО БЛС.

Виклад основного матеріалу. З метою реалізації можливостей розробленої аналітичної моделі об'єкту управління щодо прогнозування параметрів процесу ВПО було розроблено новий спосіб предиктивного управління процесом ВО БЛС з використанням ВПТ [10], який включає до себе:

- визначення фактичних поточних значень: характеристик стану пристроїв, що регулюють об'ємну частку води $\beta(\tau_i)$, та температури металу $T(\tau_i)$ у певний час їхнього вимірювання τ_i;
- розрахунки потрібних $\beta_п(\tau_{i+1})$, $T_п(\tau_{i+1})$ та прогнозних $\beta_{пр}(\tau_{i+1})$, $T_{пр}(\tau_{i+1})$ значень вказаних характеристик у наступний найближчий момент часу їхнього вимірювання τ_{i+1};
- порівняння вказаних відповідних (потрібних та прогнозних) значень коефіцієнту об'ємної частки води та температури металу з подальшим формуванням підсумкового керуючого впливу задля досягнення потрібних значень $\beta_п(\tau_{i+1})$, $T_п(\tau_{i+1})$ цих параметрів у наступний найближчий час їхнього вимірювання τ_{i+1}.

Важливими перевагами запропонованої аналітичної моделі предиктивного управління є висока адекватність аналітичної моделі об'єкту управління; суттєве зменшення обсягів комп'ютерних розрахунків в режимі реального часу порівняно з розв'язанням систем диференційних рівнянь, а також здатність аналітично визначати необхідні параметри процесу охолодження в будь-який момент часу ВО, що забезпечує предиктивний характер управління процесом ВПО.

Новостворена аналітична модель предиктивного управління була реалізована шляхом розробки програмного забезпечення у середовищі JavaScript. В якості вихідних характеристик при розрахунках використовували наступні значення параметрів технології БЛС: геометричні розміри ділянки безперервно-литої заготівки з типової низьколегованої сталі, що охолоджується за практично однакових умов в секції ЗВО: 250×1250×1000 мм; температура на початку охолодження в ЗВО: $T_0 = 1350°C$; кінцева температура перебування БЛС у ЗВО: $T_к = 920°C$; швидкість розливки сталі: $V_р = 0{,}8$ м/хв.; коефіцієнти теплопередачі води під тиском та повітря: $\alpha_В \approx 25000$ Вт/(м^2·К), $\alpha_П \approx 40$ Вт/(м^2·К), відповідно.

На рис. 1 наведено графіки розподілів температури $T(\tau)$ БЛС з низьколегованих конструкційних сталей за довжиною ЗВО згідно: розрахунків [8, 9] з використанням існуючих моделей (крива 1), експериментальних даних [9] (крива 2) щодо раціональних режимів ВО БЛС, які забезпечують мінімальну ймовірність утворення тріщин, а також відповідно до розробленої аналітичної моделі (крива 3). Розрахунки з застосуванням розробленої моделі виконувались за вказаних вище значень технологічних параметрів та початкового рівня β: $\beta_0 = 0{,}19$. Порівняння наведених даних призводить до висновків про достатньо високу точність відповідності результатів розрахунків згідно розробленої моделі з експериментальними даними, а також необхідність більш повільного охолодження БЛС у ЗВО у порівнянні з прогнозами існуючих моделей задля надійного запобігання утворенню тріщин.

Розрахунки потрібних часових залежностей $\beta_п(\tau)$ та $T_п(\tau)$ відповідно до розробленої аналітичної моделі були також виконані з застосуванням новоствореного програмного забезпечення. Моделювання фактичних значень $\beta_ф(\tau)$ та $T_ф(\tau)$ здійснювалось на підставі відповідних експериментальних промислових даних, шляхом генерування випадкових чисел за нормальними законами розподілення із середніми значеннями $\beta_п(\tau)$, $T_п(\tau)$ та середньоквадратичними стандартними відхиленнями $S_\beta = 0{,}02$ та $S_T = 5°C$, відповідно. Окрім того, під час проведення розрахунків $T_ф(\tau)$, відповідно до розробленої моделі [7], було враховано встановлений там аналітичний зв'язок $T = T(\beta)$, звідки виникають додаткові збурення $T_ф(\tau)$, обумовлені власними відхиленнями $\beta_ф(\tau)$. Характерні ділянки часових залежностей $\beta_ф(\tau)$ та $T_ф(\tau)$, що відповідають стаціонарним умовам щойно згаданого моделювання та розраховані згідно запропонованої аналітичної моделі за умов відсутності управління, наведено на рис. 2. Зміни сигналу неузгодженості $\delta(\tau)$, тобто підсумкових від-

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

хилень фактичних значень температури металу $T_ф(\tau)$ від потрібних рівнів $T_п(\tau)$ з часом охолодження в ЗВО, показано на рис. 3. Як можна бачити, максимальні абсолютні значення вказаних підсумкових відхилень становлять ~30°С, що є достатньо суттєвим з точки зору їхнього можливого впливу на рівень внутрішніх напружень. Цей факт засвідчують дані, наведені на рис. 1 (див. криві 1 та 2), з яких випливає, зокрема, що зниження температури БЛС на ~20…40°С (крива 1) відносно траєкторії охолодження (крива 2), яка експериментально визначена як «безпечна» з точки зору утворення «холодних» тріщин, викликає погіршення якості БЛС.

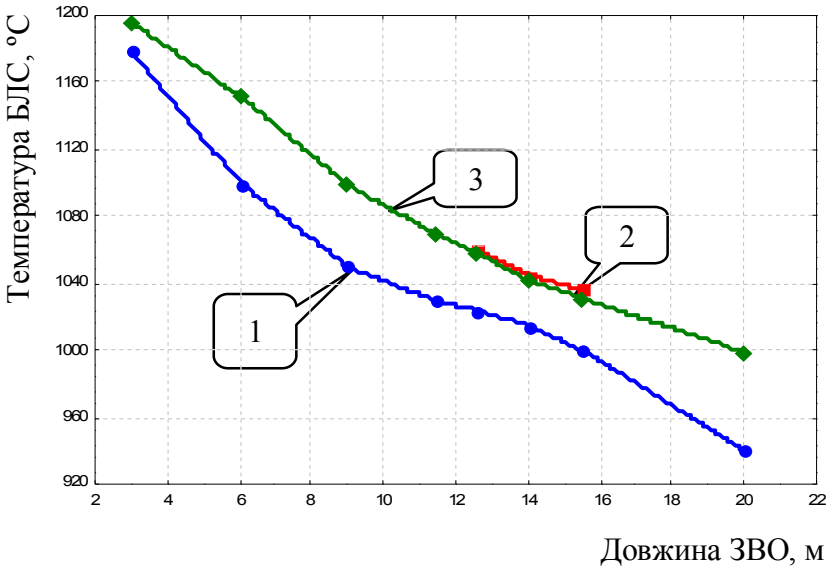


Рис.1 – Залежності температури БЛС від довжини ЗВО згідно: крива 1 – розрахунків відповідно до відомої моделі [8]; крива 2 – експериментальних даних [9]; крива 3 – розробленої аналітичної моделі

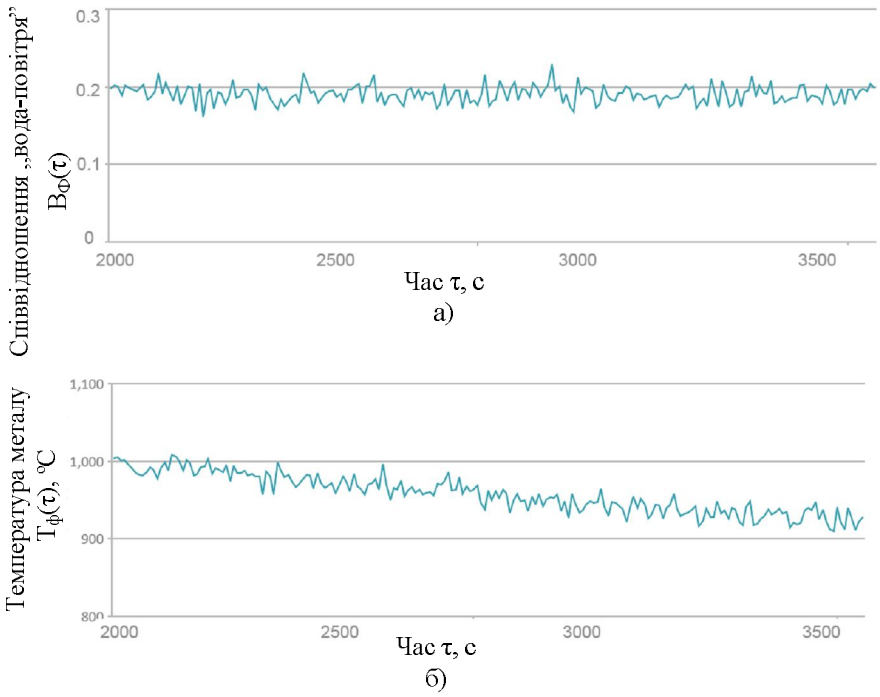


Рис. 2 – Характерні ділянки часових залежностей фактичних значень співвідношення «вода-повітря» $\beta_ф(\tau)$ (а) та температури металу $T_ф(\tau)$ БЛС (б), розраховані згідно запропонованої аналітичної моделі за стаціонарних умов моделювання

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

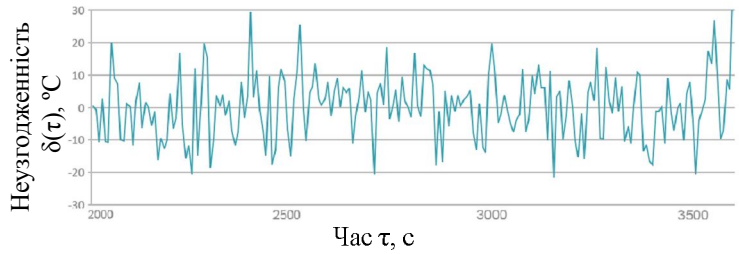


Рис. 3 – Типова ділянка часової залежності підсумкових відхилень фактичних значень $T_ф(\tau)$ температури металу від наданої траєкторії охолодження $T_п(\tau)$ за відсутності управління ВО БЛС

Часові залежності фактичної температури $T_ф(\tau)$ металу та відхилень $T_ф(\tau)$-$T_п(\tau)$, за умов предиктивного управління ВО БЛС відповідно до розробленої аналітичної моделі, наведено на рис. 4. Як можна бачити з рис.4, а, залежність $T_ф(\tau)$, в середньому, достатньо точно відповідає наданій траєкторії охолодження $T_п(\tau)$, що свідчить про високу стабільність процесу предиктивного управління згідно з розробленою аналітичної моделлю. Крім того, аналіз рис. 4, б вказує на суттєве зменшення абсолютних значень відхилень $T_ф(\tau)$-$T_п(\tau)$, які спостерігаються за умов предиктивного управління відповідно до розробленої аналітичної моделі (див. рис. 2): максимальний абсолютний рівень $|T_ф(\tau)$-$T_п(\tau)|$ при застосуванні розробленої моделі не перевищує ~15°C на відміну від ~30°C в умовах діючого виробництва, що є вкрай небезпечним з точки зору утворення холодних тріщин [10].

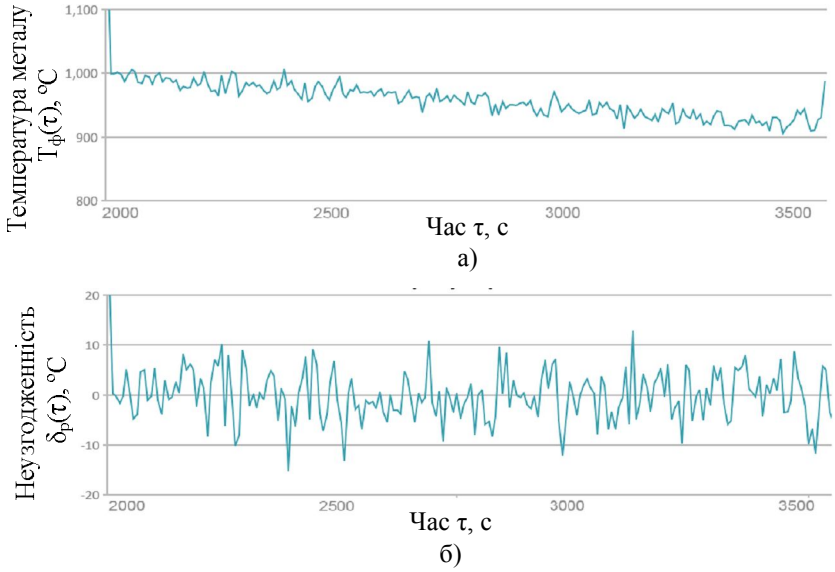


Рис. 4 – Ділянки часових залежностей фактичної температури $T_ф(\tau)$ металу БЛС (а) та підсумкових відхилень $T_ф(\tau)$ від наданої траєкторії охолодження $T_п(\tau)$ за умов предиктивного управління ВО БЛС згідно розробленої аналітичної моделі

Висновки

1. З використанням раніше запропонованої аналітичної моделі процесу ВПО металопродукції з застосуванням ВПТ та нового способу його предиктивного управління, розроблено відповідну аналітичну модель предиктивного управління, а також програмне забезпечення в середовищі JavaScript задля практичного застосування такої моделі в умовах промислових АСУ ТП.

2. Розроблене програмне забезпечення застосовано для імітаційного моделювання ВО БЛС в умовах предиктивного управління з використанням експериментально визначених вихідних технологічних параметрів.

p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X

3. Показано високу адекватність розробленої аналітичної моделі управління щодо прогнозування наданих траєкторій ВО БЛС у порівнянні з експериментальними даними та відповідними результатами розрахунків з використанням відомих напівемпіричних моделей.

4. Встановлено зменшення відхилень фактичної температури металу БЛС в умовах застосування розробленої аналітичної моделі предиктивного управління не менш ніж вдвічі у порівнянні з існуючими системами АСУ ТП, що засвідчує високу ефективність розробленого змодельованого підходу до управління ВПО металопродукції з використанням ВПТ.

5. Рівень стабілізації температури металу БЛС, що досягається при використанні розробленої моделі предиктивного управління, відповідає експериментально встановленим умовам відсутності тріщин у БЛС промислового виробництва [10], що вказує на перспективність промислового застосування запропонованої аналітичної моделі з метою підвищення якості БЛС та ефективності роботи МБЛЗ.

Перелік використаних джерел:

1. Gorni A. Accelerated Cooling of Steel Plates: The Time Has Come / A. Gorni, J. Silveira // Journal of ASTM International. – 2008. – № 8. – Pp. 358-365.
2. Чен Дж. Новые системы охлаждения для станов горячей прокатки / Дж. Чен, Т. Найхейс // Сталь. – 2005. – № 9. – С. 44-48.
3. Дюдкин Д.А. Непрерывная разливка металла / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко, А.Н. Смирнов. – М. : Теплотехник, 2009. – 528 с. – (Производство стали : в 4-х т.; Т. 4).
4. Evolution of Control Models for Secondary Cooling in Continuous Casting Process of Steel / D. Zhichao, L. Qing, W. Bao, Z. Xiaofeng, J. Zhang // Steel Research International. – 2011. – № 10. – Pp. 65-73.
5. Measurement of heat flux in dense air-mist cooling : Part I – A novel steady-state technique / C. Hernández-Bocanegra, A. Castillejos, F. Acosta-González, X. Zhou, B. Thomas // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2013. – № 44. – Pp. 147-160.
6. Mayne D. Constrained model predictive control: stability and optimality / D. Mayne, A. Rawlings, R. Scokaert // Automatica. – 2000. – № 36. – Pp. 789-814.
7. Мірошниченко В.І. Програмна реалізація аналітичної моделі управління процесом вторинного водоповітряного охолодження безперервно-литих заготівок / В.І. Мірошниченко // Университетская наука-2018 : Междунар. научно-техн. конф. (Мариуполь, 23-24 мая 2018 г.): тез. докл. в 4 т. / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2018. – Т. 2. – С. 222-224.
8. Мірошниченко В.І. Аналітичне визначення режиму охолодження листового прокату при застосуванні водоповітряної суміші / В.І. Мірошниченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 6. – С. 35-37.
9. Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывно-литого слитка / И.О. Мищенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2006. – № 3. – С. 15-21.
10. Девятов Д.Х. Определение коэффициентов теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ с помощью идентифицируемой математической модели / Д.Х. Девятов, И.И. Пантелеев // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1999. – № 8. – С. 62-65.

References:

1. Gorni A. Accelerated Cooling of Steel Plates: The Time Has Come. *Journal of ASTM International*, 2008, no. 8, pp. 358-365.
2. Cheng J., Nayheis T. Novye sistemy ohlazhdenija dlja stanov gorjachej prokatki [New cooling systems for hot rolling mills]. *Stal – Steel Journal*, 2005, no. 9, pp. 44-48. (Rus.)
3. Djudkin D.A., Kisilenko V.V., Smirnov A.N. *Proizvodstvo stali. Tom 4. Nepreryvnaia razlivka metalla* [Manufacture of Steels. V.4. Continuous metal casting]. Moscow, Teplotehnik Publ., 2009, 528 p. (Rus.)
4. Zhichao D., Qing L, Bao F, Xiaofeng Z, Zhang J. Evolution of Control Models for Secondary Cooling in Continuous Casting Process of Steel. *Steel Research International*, 2011, no. 10, pp. 65-73.
5. Hernández-Bocanegra C., Castillejos A., Acosta-González F., Zhou X, Thomas B. Measurement of heat flux in dense air-mist cooling: Part I – A novel steady – state technique. *Experimental*

Thermal and Fluid Science, 2003, no. 44, pp. 147-160.
6. Mayne D. Constrained model predictive control: stability and optimality. *Automatica*, 2000, no. 36, pp. 789-814.
7. Miroshnichenko V. Programna realizacija analitichnoï modeli upravlinnja procesom vtorinnogo vodopovitrjanogo oholodzhennja bezperervno-litih zagotivok. Anotatsii dopovidey Mizhn. nauk.-tekhn. konf. «Universitetskaja nauka-2018» [The software for the analytic model of control of secondary air-mist cooling for a steel flat product. Abstracts of Int. Sci.-Tech. Conf. «University science-2018»]. Mariupol, PSTU, 2018, vol. 2, pp. 222-224. (Ukr.)
8. Miroshnichenko V. Analitichne viznachennja rezhimu oholodzhennja listovogo prokatu pri zastosuvanni vodopovitrjanoï sumishi. [An analytic modeling the rolled sheet air-mist cooling]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and Mining Industry*, 2006, vol. 6, pp. 35-37. (Ukr.)
9. Mishchenko I.O., Dub A.B., Makarycheva E.V. Modelirovanie i optimizacija temperaturnogo polja nepreryvno-litogo slitka [Temperature field modeling and optimization for continuous cast billets]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgiia – Izvestiya. Ferrous metallurgy*, 2006, no. 3, pp. 15-21. (Rus.)
10. Deviatov D. Opredelenie kojefficientov teplootdachi v zone vtorichnogo ohlazhdenija MNLZ s pomoshh'ju identificiruemoj matematicheskoj modeli [Heat transfer coefficient calculations in secondary cooling zone of continuous caster by using an identified mathematic model]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgiia – Izvestiya. Ferrous metallurgy*, 1999, no. 8, pp. 62-65. (Rus.)

Рецензент: Є.А. Чичкарьов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.03.2018

УДК 622.83 **doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142552**

© Добровольская Л.А.[1], Клюев Д.С.[2]

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ПРОМЫШЛЕННОМ РЕГИОНЕ

В статье рассмотрена возможность использования искусственных нейронных сетей (НС) для прогнозирования степени загрязнения атмосферного воздуха в промышленном регионе. Разработана многослойная нейронная сеть, позволяющая спрогнозировать уровень загрязнения на основе данных о текущем качестве воздуха, текущих погодных условиях, прогнозе погоды, времени суток и дня недели. Прогноз составляется для каждого часа, для каждой станции, каждого загрязнителя. Горизонт прогнозирования составляет 6 часов. Определено, что максимальная точность достигается при использовании 30 нейронов на скрытом слое, что является оптимальным решением, дающим лучшую точность прогноза. Подтверждено, что создание одной универсальной нейронной сети, которая будет прогнозировать уровень загрязнений для любой станции региона, не дает точного прогноза, т. к. станции находятся в разных средах.

Ключевые слова: *прогнозирование, загрязнение атмосферного воздуха, предикторы, искусственная нейронная сеть, нейроны, настройка нейронной сети, обучение нейронной сети.*

[1] *канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, ludmila_dobrovolskaya@mail.ru*
[2] *студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь*