

УДК 669.14.018

DOI:

**Жаданос О. В., Дерев'янюк І. В., Ляшенко А. Р.****МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗПЛАВУ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ НА УСТАНОВЦІ ПІЧ-КІВШ**

Постійне збільшення вимог до якості сталей, що виплавляються, обумовлює популярність позапичної обробки сталі. Одним з основних агрегатів позапичної обробки є установка піч-ківш (УПК), яка призначена для доведення сталі за хімічним складом, десульфурзації і підігріву розплаву перед наступними технологічними операціями. Робота УПК характеризується різним режимом нагріву в залежності від включеної потужності трансформатору, що використовується. Нагрівання металу починають на більш низьких рівнях потужності, поки не стабілізується робота електричної дуги, а потім переходять на більш високі рівні. В ході обробки з метою гомогенізації розплаву його перемішують аргоном, який подають через продувний блок в днищі ковша.

Нагрівання розплаву на печі-ковші повинно проводитися до такої температури, яка дозволить компенсувати теплові витрати під час наступних технологічних операцій та забезпечити необхідний температурний діапазон перед розливанням з метою забезпечення сприятливих умов формування якісної структури зливку при мінімальній витраті електричної енергії. Таким чином, температура розплаву – один з найбільш важливих технологічних параметрів, котрий контролюється під час обробки сталі на УПК. Дослідження показали, що далеко не завжди при обробці забезпечуються режими ефективного нагрівання розплаву, що гарантовані постачальниками установок за контрактом. Причиною цього є значне відхилення значень вхідних параметрів процесу (товщини шлакового покриву, маси розплаву, температури футеровки ковша, витрат аргону, початкової температури розплаву). Температура розплаву контролюється шляхом проміжних вимірів термопарами, виконання яких можливе лише при відключенні установки, що призводить до збільшення тривалості обробки, втрат тепла і зниження енергетичного і теплового к.к.д. установки. Тому необхідно для прогнозування температури розплаву розробити математичну модель, яка, з одного боку, досить точно прогнозувала динаміку температури розплаву, а з іншого (для спрощення її інтеграції в АСУ), описувалася б досить простими аналітичними виразами з мінімумом вхідних параметрів.

Проблемам математичного моделювання теплоенергетичних процесів в агрегатах позапичної обробки сталі присвячені роботи [1–5]. Розроблена комплексна модель теплообмінних процесів в об'ємі сталі з урахуванням її перемішування, в стінці і склепінні ковшу, що охолоджується водою, з урахуванням екранування дуги шлаком, яка дозволяє враховувати вплив режимів роботи УПК на втрати тепла, а також розроблені рекомендації для оптимізації управління тепловим і електричним режимами УПК [1]. Розглянуто вплив газонаповненості розплаву під час продування і температури газів під кришкою УПК на середню температуру розплаву, що рафінується [2], досліджено ефективність перетворення електричної енергії, визначений енергетичний к.к.д. УПК при нагріванні розплаву і її тепловий баланс з урахуванням технологічних зупинок і нестационарність початкових умов теплопередачі всередині футерування ковша перед обробкою [3]. Представлені результати чисельного дослідження теплового стану металеві ванни місткістю 350 т УПК з трансформатором потужністю 45 МВ·А, зіставлені варіанти нагріву розплаву при продуванні аргоном з використанням одно-, дво- і трьохфурменого компонування донного блоку для продування [4]. Розроблено алгоритм оптимального управління відновним періодом плавки в дугових сталеплавильних печах і технологічних комплексах піч-ківш, що забезпечує стабільність якості виплавленої сталі при мінімальних енергетичних витратах [5].

Існує два типи моделей, що характеризують динаміку температури розплаву: моделі, що базуються на законах теплофізики, термохімії та термодинаміки, і регресійні моделі. Перевагою перших є висока точність прогнозу [1–5], але побудова таких моделей вимагає велими складних обчислень. Разом з тим, фактичні значення величин не завжди співпадають з теоретичними, що потребує їх наступної корекції на підставі отриманих експериментальних даних. Регресійні моделі менш точні, але і при їх використанні можливо отримати данні, котрі дозволяють оцінювати тепловий стан і хімічний склад розплаву під час його обробки на УПК. Наприклад, в роботі [6] отримані регресійні моделі зміни вмісту С, Mn, Si, Cr в залежності від маси введених легуючих і розкислювачів (вуглецю, ФС65, MnC17, ФХ800) при обробці підшипникової сталі на УПК, котрі задовольняють вимогам до точності прогнозування.

Тому доцільно, базуючись на досвіді авторів [6], розробити регресійну модель прогнозу температури розплаву і проаналізувати її точність.

Метою дослідження є отримання регресійної моделі зміни температури розплаву під час його обробки на УПК в залежності від кількості витраченої активної енергії, часу перебування розплаву в ковші та інших технологічних параметрів.

### ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ

Зміна температури оброблюваної сталі під час обробки на УПК відбувається внаслідок нагрівання електричними дугами і втрат теплоти розплавом.

Втрати теплоти відбуваються за рахунок:

- випромінювання з поверхні шлакометалічного розплаву;
- нагріву і теплопередачі через футерівку ковша;
- нагріву та введення в розплав інертного газу;
- нагріву, розплавлення, хімічних реакцій введення легуючих добавок.

Результати розрахунків, наведені в [7] показують, що втрати, пов'язані з нагріванням інертного газу, що вдувається в ківш, вкрай незначні, і ними можна знехтувати.

Виконаний в [6] розрахунок зміни температури розплаву в результаті введення легуючих, розкислювачів та шлакоутворюючих і аналіз експериментальних даних про кількість добавок, що вводяться в розплав показав, що введення добавок під час обробки на УПК викликає падіння температури від 4 до 35 градусів. Втрати на введення добавок повинні розраховуватися для кожного ковша індивідуально.

Для аналізу були відібрані дані по 63 обробкам розплаву на установці піч-ківш (маса розплаву в ковші  $110 \pm 5$  т, повна потужність трансформатору 14,4 МВ·А, активна потужність 9,4 МВт). Аналізувалися наступні параметри:

- загальний час обробки ковша –  $t_{обр}$ ;
- час нагрівання розплаву –  $\sum_{i=1}^n t_i$ ;
- час проміжних зупинок –  $\sum_{i=1}^n t_{зупи.і}$ ;
- час між випуском розплаву зі сталеплавильного агрегату і початком обробки на УПК –  $t_{вип}$ ;
- температура розплаву перед початком обробки –  $T_{n-к.поч}$ ;
- кількість витраченої активної електричної енергії –  $E_A$ ;
- кількість введених добавок;
- температура розплаву після закінчення обробки –  $T_{n-к.кін}$ .

На рис. 1 приведена спрощена циклограма процесу позапічної обробки, починаючи з моменту випуску сталі зі сталеплавильної печі в ківш і закінчуючи обробкою розплаву на УПК.

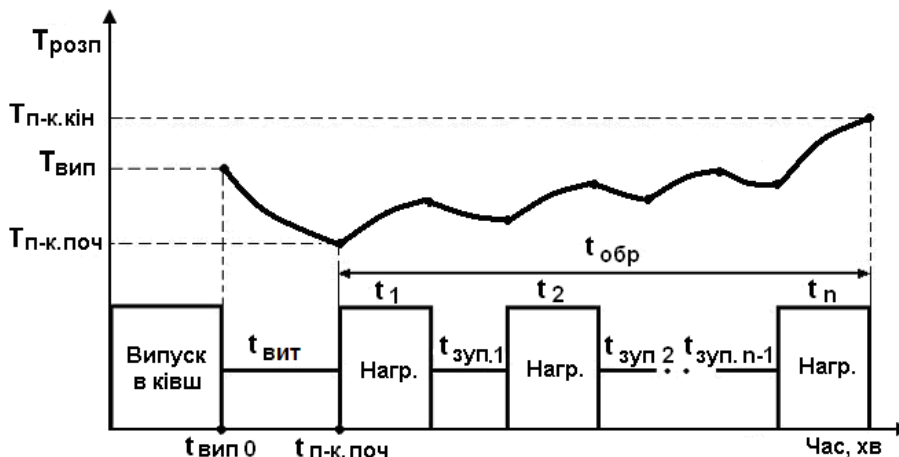


Рис. 1. Спрощена циклограма процесу позапічної обробки сталі на УПК

З метою виділення основних факторів, що впливають на зміну температури розплаву під час обробки на печі-ковші, для кожної з аналізованих обробок були визначені зміна температури за рахунок введення легуючих елементів, а також зміна температури під час проміжних пауз і зроблені відповідні коригування на величину зміни температури розплаву.

Отримані дані були апроксимовані регресійним рівнянням виду:

$$\Delta T = a_1 \cdot E_A + a_2 \cdot t_{вит} + a_3 \cdot T_{n-к.поч} + a_0, \tag{1}$$

де  $a_1, a_2, a_3, a_0$  – коефіцієнти рівняння;  $\Delta T$  – зміна температури розплаву;  $E_A$  – кількість витраченої активної електричної енергії, кВт·год;  $t_{вит}$  – час перебування розплаву в ковші перед початком обробки на установці;  $T_{n-к.поч}$  – температура розплаву перед початком обробки.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресійного рівняння за критерієм Стьюдента показала, що коефіцієнти  $a_3$  і  $a_0$  не є значимими. Також встановлено, що між параметрами  $t_{вит}$  і  $E_A$  кореляційний зв'язок слабкий. Між параметром  $T_{n-к.поч}$  і параметрами  $t_{вит}$ ,  $E_A$  існують тісні кореляційні зв'язки ( $r_{t_{вит}, T_{n-к.поч}} = 0,71$ ,  $r_{t_{вит}, E_A} = 0,66$ ). Це обумовлено тим, що значення температур розплаву різних обробок після випуску з печі в ковші знаходяться в досить вузькому діапазоні температур 1580 ... 1630 °С. Тому, чим довше розплав знаходиться в ковші до обробки на установці, тим нижче значення температури перед обробкою, і, відповідно, чим нижче температура розплаву перед обробкою, тим більша кількість енергії необхідно затратити на нагрівання до заданої температури.

Виходячи з цього, фактор  $T_{n-к.поч}$  був виключений з рівняння. Тому остаточно регресійна модель має наступний вид:

$$\Delta T = a_1 \cdot E_A + a_2 \cdot t_{вит} \tag{2}$$

Для оцінки адекватності регресійної моделі була застосована перевірка за критерієм Фішера [8]. За результатами обчислень отримані наступні значення  $F_{розр} = 157$ , а  $F_{кр} = 3,2$ , тобто, рівняння (2) є значимим.

Отриманні значення коефіцієнтів  $a_1 = 0,018$  і  $a_2 = 0,25$ . Коефіцієнт детермінованості  $r^2$  отриманої регресійної моделі складає 0,84, а абсолютна похибка прогнозування – 9 градусів. На рис. 2 представлені експериментальні данні і апроксимуюча площина.

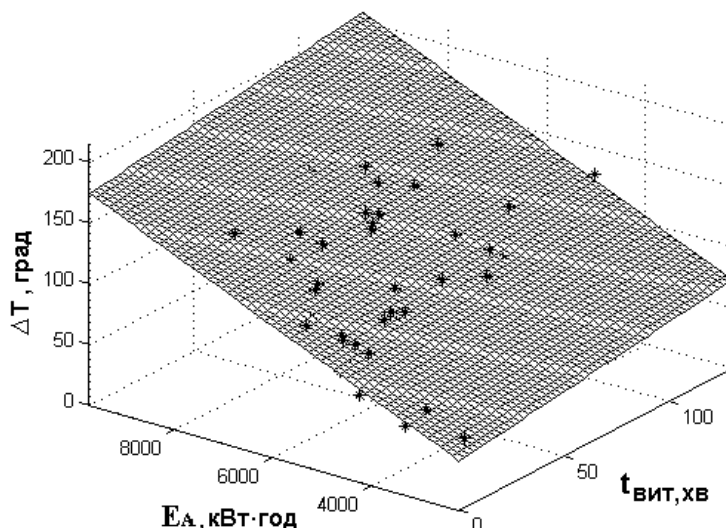


Рис. 2. Експериментальні точки та апроксимуюча площина

Наведене вище рівняння дозволяє оцінити зміну температури розплаву під час обробки в залежності від витраченої активної енергії і часу перебування розплаву в ковші до початку обробки без урахування зниження температури розплаву за рахунок введення легуючих, розкислювачів і шлаку утворювачів (повинні розраховуватися для кожної обробки індивідуально).

### ВИСНОВКИ

В результаті аналізу експериментальних даних отримана регресійна модель зміни температури розплаву під час обробки на УПК, що дозволяє прогнозувати динаміку температури розплаву по ходу його обробки в залежності від кількості витраченої енергії і часу перебування розплаву в ковші перед обробкою без урахування зниження температури розплаву за рахунок введення легуючих, розкислювачів і шлаку утворювачів (повинні розраховуватися для кожної обробки індивідуально). Проведений аналіз адекватності отриманої регресійної моделі експериментальним даним. Встановлено, що коефіцієнт детермінованості  $r^2$  отриманої регресійної моделі складає 0,84, а абсолютна похибка прогнозування – 9 градусів.

Для створення більш точної моделі прогнозу необхідно врахувати додаткові фактори, зокрема ступінь екранування електричних дуг шлаком, наявність відкритої поверхні розплаву, що утворюється при великих витратах аргону під час продування.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябчикова Е. С., Рябчиков М. Ю. Математическое обеспечение модели процессов теплообмена агрегата печь-ковш. *Теория и технология металлургического производства*. 2013. № 1 (13). С. 29–31.
2. Новокрещенов С. А., Швыдкий В. С., Жуков В. П., Черемисин Д. Д. Математическое моделирование теплового режима печи-ковша при пузырьковой продувке расплава газом. Сообщение IV. *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2016. № 1. С. 72–78.
3. Zhadanos O. V., Derevyanko I. V., Chaika D. O. Dynamic model of heat engineering processes in electrical arc ladle-furnace plant to develop automated control system. *Proceedings of 9th international conference of young scientists on welding and related technologies, 23–26 May 2017, Kiev, Ukraine*. P. 72–76.
4. Пиптюк В. П., Поляков В. Ф., Самохвалов С. Е., Исаев О. Б., Павлов С. Н., Травинчев А. А. Изучение теплового состояния ванны установки ковш-печь. *Металлург*. 2011. № 7. С. 50–53.
5. Разживин А. В. Оптимизация теплового режима плавки в технологических комплексах "печь-ковш". *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. 2010. № 18 (169). С. 78–83.
6. Zhadanos O. V., Derevyanko I. V., Proydak Y. S., Gasik M. I., Panchenko O. I., Salnikov A. S., Yakovitsky O. V. Development the automated information system of ladle-furnace process to predict the content of alloying elements in bearing steel. *Proceedings of the International conference on Information and Digital technologies IDT-2017, 5th to 7th July 2017. Zilina, Slovakia*, 2017. P. 476–483.

7. Рейхле Л. Аргон в металлургии. перев. с немецк. Москва: Металлургия, 1971. 120 с.
8. Иванова В. М., Калинина В. М., Нешумова Л. А. и др. Математическая статистика: учебник. 2-е изд, перераб. и доп. Москва: Высш. школа, 1981. 371 с.

## REFERENCES

1. Ryabchikova E. S., Ryabchikov M. Y. Mathematical support of the model of heat exchange processes of the furnace-bucket unit. *Theory and technology of metallurgical production*. 2013, № 1 (13), p. 29–31.
2. Novokrechenov S. A., Shvidkiy V. S., Zhukov V. P., Cheremisin D. D. Mathematical modeling of the thermal regime of the ladle furnace during bubble purging of the melt with gas. Message IV. *News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy*. 2016, № 1, pp. 72–78.
3. Zhadanos O. V., Derevyanko I. V., Chaika D. O. Dynamic model of heat engineering processes in electrical arc ladle-furnace plant to develop automated control system. *Proceedings of 9th international conference of young scientists on welding and related technologies, 23–26 May 2017, Kiev, Ukraine*. P. 72–76.
4. Piptuk V. P., Polyakov V. F., Samokhvalov S. E., Isaev O. B., Pvllov S. N., Travinchev A. A. Study of the thermal state of the bucket-oven installation bath. *Metallurgist*. 2011, № 7, pp. 50–53.
5. Razhivin A. V. Optimization of the thermal mode of melting in technological complexes "furnace-ladle". *Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Computing and automation*. 2010, № 18 (169), pp. 78–83.
6. Zhadanos O. V., Derevyanko I. V., Proydak Y. S., Gasik M. I., Panchenko O. I., Salnikov A. S., Yakovitsky O. V. Development the automated information system of ladle-furnace process to predict the content of alloying elements in bearing steel. *Proceedings of the International conference on Information and Digital technologies IDT-2017, 5th to 7th July 2017. Zilina: Slovakia, 2017*, pp. 476–483.
7. Reihle L. Argon in metallurgy: trans. with German. Moscow: Metallurgy, 1971. 120 p.
8. Ivanova V. M., Kalinina V. M., Neshumova L. A. i dr. Mathematical statistics. Moscow: Higher. school, 1981. 371 p.

## АВТОРИ / АВТОРЫ / AUTORS

Жаданос О. В. – канд. техн. наук, доц. кафедри електрометалургії НМетАУ;  
 Жаданос А. В. – канд. техн. наук, доц. кафедри електрометалургії НМетАУ;  
 Zhadanos O. V. – candidate of technical science, associate professor NMetAU.  
 E-mail: [Alexzhad1980@gmail.com](mailto:Alexzhad1980@gmail.com)

Дерев'янюк І. В. – канд. техн. наук, доц. кафедри електрометалургії НМетАУ;  
 Дерев'янюк І. В. – канд. техн. наук, доц. кафедри електрометалургії НМетАУ;  
 Derevyanko I. V. – candidate of technical science, associate professor NMetAU.

Ляшенко А. Р. – студент гр. МЕ04-17 НМетАУ;  
 Ляшенко А. Р. – студент гр. МЕ04-17 НМетАУ;  
 Lyashenko A. R. – student NMetAU.

Національна металургійна академія України (НМетАУ), м. Дніпро;  
 Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ), г. Днепр.  
 National Metallurgical Academy of Ukraine (NMetAU), Dnipro.

## АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ANNOTATION

**Жаданос О. В., Дерев'янюк І. В., Ляшенко А. Р. Моделирование динамики температуры расплаву при позапічній обробці на установці піч-ківш. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2020. № 1 (48).**

На сьогодні позапічна обробка расплаву на установці піч-ківш (УПК) є важливою технологічною ланкою у виробництві якісних сталей. Однією з задач позапічної обробки сталі на УПК є забезпечення перед розливом стабільної регламентованої технологічними вимогами температури металу, що необхідно для забезпечення сприятливих умов формування якісної структури зливку. При цьому необхідно мінімізувати витрати електричної енергії. Виходячи з цього, побудова математичної моделі теплоенергетичних процесів позапічної обробки, яка, з одного боку, дозволить з достатньою точністю прогнозувати температуру металу, а з іншого (для спрощення її інтеграції в АСУ), описувалася б досить простими аналітичними виразами з мінімумом вхідних параметрів, надасть можливість знизити енергоємність процесу позапічної обробки сталі. Метою даної статті є стохастичне моделювання динаміки температури расплаву під час позапічної обробки. В результаті аналізу експериментальних

даних отримана регресійна модель зміни температури розплаву під час обробки на УПК, що дозволяє прогнозувати динаміку температури розплаву в залежності від кількості витраченої енергії і часу перебування розплаву в ковші перед обробкою без урахування зниження температури розплаву за рахунок введення легуючих, розкислювачів і шлакуутворювачів (повинні розраховуватися для кожної обробки індивідуально). Проведений аналіз адекватності отриманої регресійної моделі експериментальним даним. Встановлено, що коефіцієнт детермінованості моделі складає 0,84, а абсолютна похибка прогнозування - 9 градусів. Для створення більш точної моделі прогнозу необхідно врахувати додаткові фактори, зокрема ступінь екранування електричних дуг шлаком, наявність відкритої поверхні розплаву, що утворюється при великих витратах аргону під час продування.

**Ключові слова:** моделювання, регресійне рівняння, установка піч-ківш, активна електрична енергія, температура розплаву, адекватність моделі, коефіцієнт детермінованості, абсолютна похибка прогнозування.

**Жаданос А. В., Деревянко И. В., Ляшенко А. Г. Моделирование динамики температуры расплава при внепечной обработке на установке печь-ковш. Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. 2020. № 1 (48).**

На сегодня внепечная обработка расплава на установке печь-ковш (УПК) является важной технологической звеном в производстве качественных сталей. Одной из задач внепечной обработки стали на УПК - обеспечение перед разливкой стабильной регламентированной технологическими требованиями температуры металла, что необходимо для обеспечения благоприятных условий формирования качественной структуры слитка. При этом необходимо минимизировать расходы электроэнергии. Исходя из этого, построение математической модели теплоэнергетических процессов внепечной обработки, которая, с одной стороны, позволит с достаточной точностью прогнозировать температуру металла, а с другой (для упрощения ее интеграции в АСУ), описывалась бы достаточно простыми аналитическими выражениями с минимумом входных параметров, позволит снизить энергоемкость процесса внепечной обработки стали. Целью данной статьи является стохастическое моделирование динамики температуры расплава при внепечной обработке. В результате анализа экспериментальных данных получена регрессионная модель изменения температуры расплава во время обработки на УПК, что позволяет прогнозировать динамику температуры расплава в зависимости от количества затраченной энергии и времени пребывания расплава в ковше перед обработкой без учета снижения температуры расплава за счет введения легирующих, раскислителей и шлакутворювачей (должны рассчитываться для каждой обработки индивидуально). Проведенный анализ адекватности полученной регрессионной модели экспериментальным данным. Установлено, что коэффициент детерминированности модели составляет 0,84, а абсолютная погрешность прогнозувания - 9 градусов. Для создания более точной модели прогноза необходимо учесть дополнительные факторы, в частности степень экранирования электрических дуг шлаком, наличие открытой поверхности расплава, образующейся при больших расходах аргона при продувке.

**Ключевые слова:** моделирование, регрессионное уравнение, установка печь-ковш, активная электрическая энергия, температура расплава, адекватность модели, коэффициент детерминированности, абсолютная ошибка прогнозувания.

**Zhadanos O. V., Derevyanko I. V., Lyashenko A. R. Modeling of melt temperature dynamics during out-of-furnace processing on a ladle installation. Herald of the DSEA. 2020. No. 1(48).**

Today secondary metallurgy in ladle-furnace (LF) is an important technological operation during production of high-quality steels. One of the goals of LF process is to ensure before casting that the temperature of the metal will be stable and regulated by technological requirements. This is necessary to ensure favorable conditions for the formation of a high-quality structure of the ingot. In this case, it is necessary to minimize energy consumption. Therefore design of the mathematical model of heat and power processes during LF-processing, which, on the one hand, will make it possible to predict the temperature of the metal with sufficient accuracy, and, on the other hand (to simplify its integration in ACS), would be described by rather simple analytical expressions with a minimum of input parameters, will allow reduce the energy consumption of the secondary metallurgy. The purpose of this article is stochastic modeling of the dynamics of melt temperature during LF processing. As a result of the analysis of the experimental data, a regression model of change the melt temperature during LF process is obtained, which allows predicting the dynamics of the melt temperature depending upon the amount of active energy consumption and the residence time of the melt in the ladle before LF processing. This model does not take into account the decrease of the melt temperature due to adding of alloys, deoxidizers and slag-forming elements (temperature changing must be calculated for each ladle individually). The analysis of the adequacy of the obtained regression model to experimental data was performed. It was found that the determination coefficient of the model is 0,84, and the absolute forecast error is 9 degrees. To create a more accurate forecast model, it is necessary to take into account additional factors, in particular, the degree of shielding of electric arcs by slag, the presence of an open melt surface formed is case of high argon consumption during blowing.

**Keywords:** modeling, regression equation, ladle-furnace, active electric energy, melt temperature, model adequacy, determination coefficient, absolute forecast error.

*Стаття надійшла до редакції 11.01.2020 р.*