



Исследование однородности аглоруды при применении разных способов усреднения на открытом складе

M.E. Тараненко; В.Е. Мальцева

Губкинский филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Россия

Аннотация: В современных условиях развития металлургии задача обеспечения равномерности и стабильности сырьевой базы занимает ключевое место, поскольку от этих параметров напрямую зависят основные технологические показатели и качество выпускаемого металла. Аглоруда, являющаяся важнейшим компонентом загрузки доменных печей, предъявляет повышенные требования к однородности своих свойств. Колебания в химическом и гранулометрическом составе аглоруды негативно отражаются на устойчивости работы доменного агрегата, вызывают перерасход кокса, снижение общей производительности и ухудшение технологических характеристик получаемого чугуна.

В данной статье рассмотрены результаты исследований по моделированию альтернативных технологий усреднения аглоруды.

Ключевые слова: однородность, качество смешивания, аглоруда, усреднение, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, массовая доля компонента.

Исследования выполнены в лаборатории обогащения полезных ископаемых ГФ НИТУ МИСИС посредством моделирования нескольких вариантов усреднения.

Анализ научных трудов повышения стабильности работы и эффективности процессов металлургического доменного производства подтверждает высокую актуальность задачи обеспечения равномерности и стабильности сырьевой базы - аглоруды, в статье рассматриваются следующие научные работы:

В работе [1] приводятся основы металлургического производства, детальное описание доменного производства, существующих классических и инновационных технологий выплавки стали, конструкций доменных печей, подробно описаны термодинамические процессы и химические реакции, протекающие в агрегатах выплавки и внепечной обработки стали.

В работах [2,3,4] детально рассматриваются существующие подходы шихтования металлургического сырья для получения однородной массы и



управление данными процессами в металлургическом производстве.

В работах [5,6] рассматриваются общие методы статистической обработки больших объемов данных, в свою очередь в работах [7,8] приведены подходы оценки степени смешивания двух и более компонентов с использованием методов статистического анализа.

В работах [9, 10] рассмотрены актуальные вопросы энергоэффективности на промышленных предприятиях, предложены решения, которые позволит свести к минимуму перерасход ресурсов на этапах измельчения и обогащения железорудного сырья.

В работе [11] приведены результаты численного моделирования при смешивании гранулированных потоков, с последующей перепроверкой полученных результатов.

В работах [12, 13] показаны экспериментальные наработки закономерностей поведения процессов смешивания гранулируемых потоков, сегрегации в плотных сдвиговых потоках, а также эффекты взаимодействия частиц.

Современные методы оценки степени смешивания полезного ископаемого основаны на методах статистического анализа. О качестве смеси судят по степени распределения одного ценного (извлекаемого) компонента в массе второго (пустой породы). В двухкомпонентной смеси случайной величиной X является содержание ценного компонента, например, металла в руде. Случайная дискретная величина X может быть полностью охарактеризована, если известны: закон ее распределения, математическое ожидание $E(X)$, дисперсия или среднее квадратическое отклонение [5,6].

За критерий оценки качества усредненного сырья принимают среднее квадратическое отклонение от среднего содержания ценного компонента в пробах, отобранных из смеси [7,8]:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где:

C_i - значение случайной величины С в i -м опыте; в нашем случае это содержание ценного компонента в i -й пробе);

\bar{C} - среднее арифметическое значение содержания ценного компонента в n отобранных проб.

В ряде случаев удобнее (необходимо) использовать безразмерный показатель вариации - коэффициент вариации:

$$V = (\sigma / M) * 100\%, \quad (2)$$

Формула расчета V основывается на отношении стандартного отклонения (σ) к среднему значению (M) и выражается в процентах, где: σ - стандартное отклонение; M - среднее арифметическое значение.

Коэффициент усреднения определяют по формуле:

$$K = V_2 / V_1, \quad (3)$$

где: V_1, V_2 - коэффициенты вариации показателя качества смеси до и после усреднения.

Коэффициент однородности представляет отношение среднего минимального значения параметра материала к среднему максимальному.

$$K_0 = \frac{x_{cp} - \Delta x_{cp}}{x_{cp} + \Delta x_{cp}}, \quad (4)$$

Численная величина этого коэффициента при повышении однородности приближается к 1 или 100 %.

Среднее абсолютное отклонение:

$$\Delta X_{CP} = \frac{\Sigma(X_{CP} - X_i)}{n}, \quad (5)$$

Этот показатель имеет вполне определенный физический смысл, представляя собой наиболее вероятное максимальное отклонение от среднего значения параметра в ту или другую сторону; общая амплитуда колебаний значений параметра составляет $2\Delta x_{cp}$ [1].

Для исследования взята аглоруда с показателями качества, приведенными в таблице 1:

Таблица 1 – Химический состав проб исходной аглоруды разного сорта

№	Массовая доля , %					
	Feобщ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	п.п.п.	Собщ	P
1	62,25	5,55	1,50	2,34	0,070	0,046
2	54,88	13,47	2,28	4,86	0,188	0,043
3	40,91	28,90	3,46	4,75	0,063	0,046

Далее представлен модельный ряд способов усреднения аглоруды [2–4].

В качестве эталона принимаем многократное перемешивание аглоруды ручным способом с последующим усреднением в барабанном смесителе [11].

Первый способ: аглоруда проходит несколько стадий перегрузок (рисунок 1).

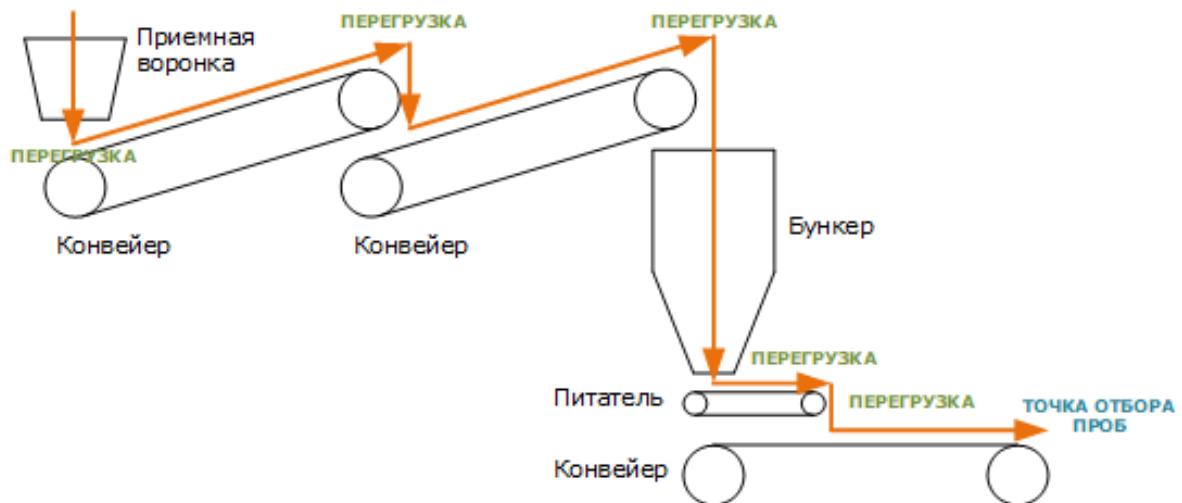


Рис. 1. - Схема моделирования – БАЗА

Аглоруда подается в приемную воронку из трех конусов, сформированных из разного качества по массовой доле железа и по массовой доле оксида кремния. При выполнении моделирования учитывались все

требования и техники пробоотбора и пробоподготовки. Количество отбираемых проб для каждой модели - 15. Общая масса руды для одного испытания - 150 кг.

Второй способ – формирование штабеля: послойная укладка и поперечная выработка (рисунок 2).

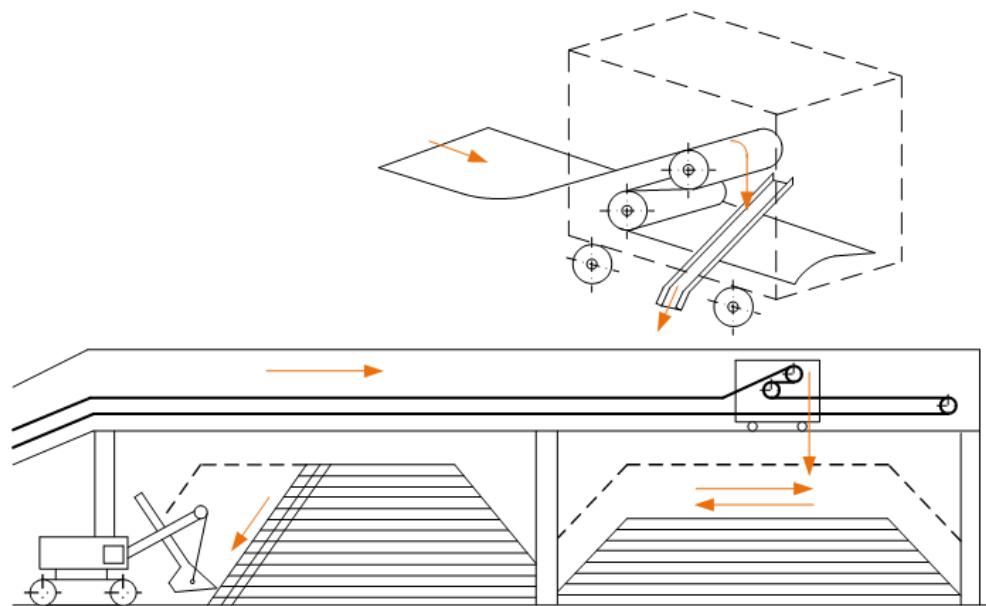


Рис. 2. - Послойная укладка и поперечная выработка

Третий способ - формирование штабеля в виде конусов с продольно-поперечной выработкой уступами (рисунки 3, 4).

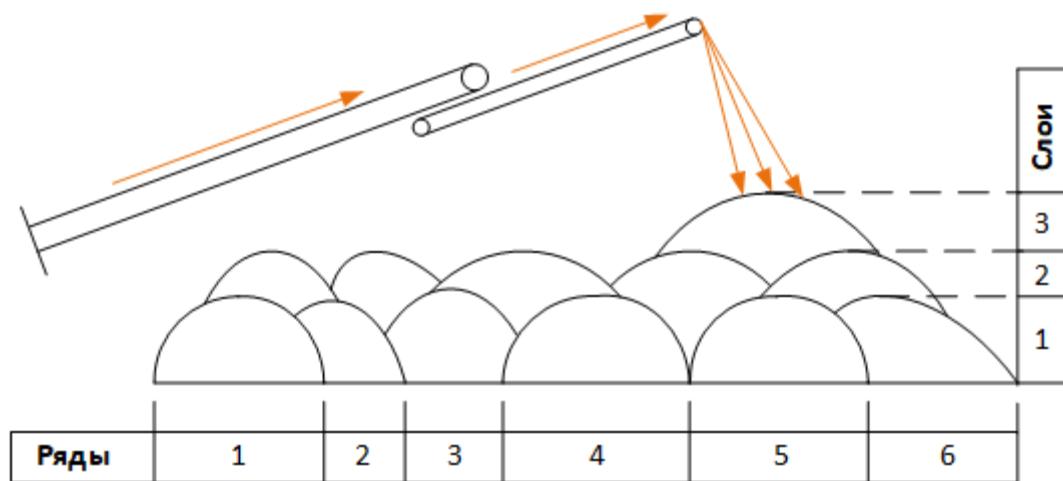


Рис. 3. - Укладка слоев штабеля в виде конусов и продольно-поперечной выработкой уступами

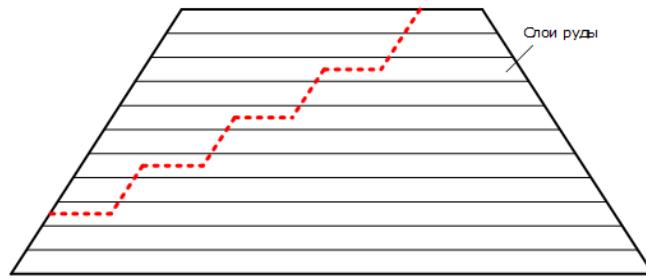


Рис. 4. - Выработка уступами

Четвертый способ - формирование штабеля с послойной укладкой и поперечной выработкой и последующим смещиванием в барабанном смесителе (рисунок 5)

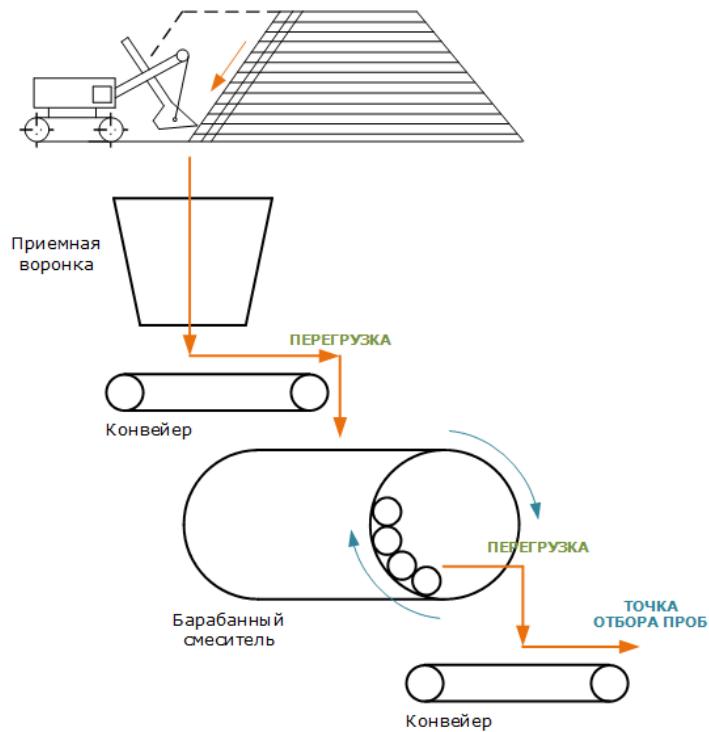


Рис. 5. - Схема моделирования формирования штабеля с послойной укладкой и поперечным способом выработки и последующим смещиванием в барабанном смесителе

Пятый способ - дозирование руды разного качества погрузчиком и смещивание в барабанном смесителе (время смещивания в барабане 30 сек.). Перед приемной воронкой расположены три конуса с рудой разного качества

по массовой доле железа и оксида кремния. Загрузка ведется погрузчиком из приготовленных конусов в соотношении, отвечающих требованиям расчетного содержания железа и оксида кремния в готовом продукте.

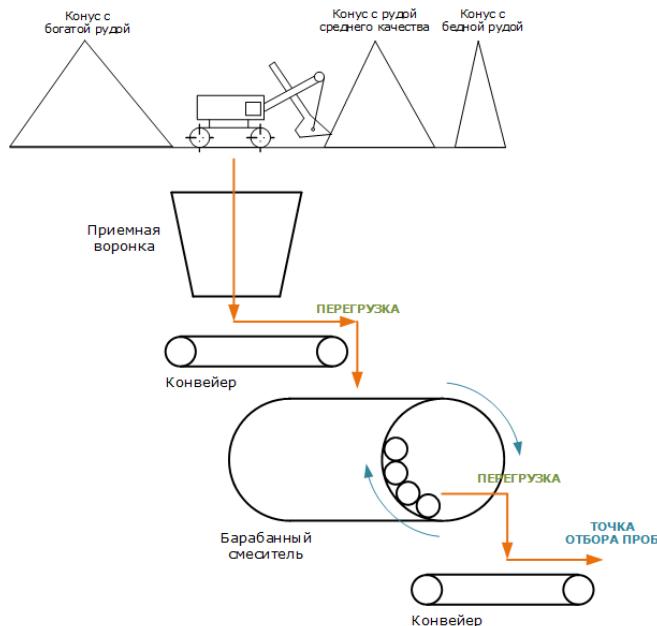


Рис. 6. - Схема моделирования смещивания в барабанном смесителе с дозированием руды разного качества погрузчиком (время смещивания в барабане 30 сек)

Шестой способ – эталон или «идеальное» перемешивание.

Для сравнения полученных результатов математической обработки схем моделирования исходили из условий, что $\Delta\beta_{\text{отн}}$ (эталон), % – улучшение (ухудшение) СКО по экспериментальным вариантам относительно СКО по эталону [12–13].

Относительную величину уменьшения (увеличения) СКО находим из условий:

$$\Delta\beta_{\text{отн}} = \Delta\beta/\beta * 100\%;$$

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_i,$$

где: β_1 – СКО, полученное по результатам «идеального» смещивания (ручное перемешивание + барабанный смеситель) аглоруды с определением Fe, SiO₂; β_i – СКО, полученное по результатам исследований по разным

вариантам усреднения (Fe, SiO₂).

Лучшие технологии относительно варианта идеального перемешивания (эталон) приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 - Варианты технологий усреднения, приближенные к идеальной (по массовой доле железа)

№	Вариант усреднения шихты	Показатели качества по массовой доле железа в агломерационной шихте				
		Δ $\varphi_{отн}$ (относите льно эталона), %	ср. знач. %	σ (СКО)	V	Ko
1	«Идеальное» перемешивание (эталон)	-	57,82	0,6	1,0	0,98
2	Укладка конусами и поперечная выработка уступами	74	55,88	0,66	1,17	0,98
3	Штабель: послойная укладка и поперечная выработка + смешивание в барабанном смесителе	69	58,18	0,8	1,3	0,98

Таблица 3 - Варианты технологий усреднения, приближенные к идеальной (по массовой доле оксида кремния)

№	Вариант усреднения шихты	Показатели качества по массовой доле оксида кремния в агломерационной шихте				
		Δ $\varphi_{отн}$ (относите льно эталона), %	ср. знач. %	σ (СКО)	V	Ko
1	«Идеальное» перемешивание (эталон)	-	10,02	0,66	7,0	0,89
2	Укладка конусами и поперечная выработка уступами	67	12,12	0,84	6,93	0,89
3	Штабель: послойная укладка и поперечная выработка + смешивание в барабанном смесителе	64	10,06	0,94	9,29	0,85



Заключение

В результате выполненной работы были сделаны выводы:

1. Большой разброс показателей качества рудного сырья непосредственно, поступающего на склад для отгрузки потребителям, без предварительных нескольких этапов усреднения, всегда будут создавать проблемы однородности продукции, что в настоящее время имеет место на производстве.
2. Из пяти рассмотренных способах повышения качества усреднения аглоруды наилучшие результаты достигнуты при укладке штабеля конусами и выработки уступами.
3. Исключение подмешивания бедной руды с пустого отвала в шихту, позволит обеспечить необходимую степень усреднения и качество отгружаемой продукции по существующей технологии работы шихтовального склада – без необходимости реконструкции.

Потеря эффекта от уменьшения количества отгрузки бедной руды может быть в значительной мере компенсирована на этапе металлургического передела за счет сокращения удельных энергозатрат [9,10].



Литература

1. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. М.: Академкнига, 2005. 768 с.
2. Куди А.Н., Долгунин В.Н. Сегрегация и миграция в гравитационных потоках зернистых материалов: механизмы, интенсификация и технологии: монография. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. 136 с.
3. Селезнев В.С., Мальцева В.Е., Чукин Д.М., Катаев А.П., Ложкин И.А. Сортировка и отгрузка окатышей. Экология фабрик окомкования: монография. М.: Металлургиздат, 2024. 330 с.
4. Тараненко М.Е., Мальцева В.Е. Управление качеством руд. Существующие подходы автоматизации технологических процессов на производстве: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2024. 284 с.
5. Ефимова М.Р., Петрова Е.В., Румянцев В.Н. Общая теория статистики: учебник. М.: ИНФРА-М, 2010. 416 с.
6. Громыко Г.Л. Теория статистики: учебник. М.: ИНФРА-М, 2010. 160 с.
7. Шорохова И.С., Кисляк Н.В., Мариев О.С. Статистические методы анализа. М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал, федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2015. 300 с.
8. Иванов Ю.Н. Экономическая статистика: учебник. М.: ИНФРА-М, 2010. 584 с.
9. Taranenko M.E. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8328.
10. Taranenko M.E. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8371.
11. Windows Y., Tunuguntla D., Parker D. C.R.K. Numerical Modelling of Granular Flows: a Reality Check / C.R.K. // Computational Particle Mechanics. -



2016. - Т. 3. - №. 3. - P. 311-332.

12. Dolgunin V., Kudi A., Ukolov A., Tuev M. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles // Chemical Engineering Research and Design. - 2017. - №. 122. - P. 22-32.

13. Hill K., Tan D. Segregation in Dense Sheared Flows: Gravity, Temperature Gradients, and Stress Partitioning // J. Fluid Meeh. - 2014. - №. 756. - P. 54-88.

References

1. Voskobojnikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. Obshchaya metallurgiya [General metallurgy]. M.: Akademkniga, 2005. 768 p.

2. Kudi A.N., Dolgunin V.N. Segregatsiya i migratsiya v gravitatsionnykh potokakh zernistykh materialov: mekhanizmy, intensifikatsiya i tekhnologii: monografiya [Segregation and Migration in Gravitational Flows of Granular Materials: Mechanisms, Intensification, and Technologies: A Monograph]. Tambov: Izdatel'skiy tsentr FGBOU VO «TGTU», 2019. 136 p.

3. Seleznev V.S., Mal'tseva V.E., Chukin D.M., Kataev A.P., Lozhkin I.A. Sortirovka i otgruzka okatyshey. Ekologiya fabrik okomkovaniya: monografiya [Sorting and shipping of pellets. Ecology of pelletizing factories: monograph]. M.: Metallurgizdat, 2024. 330 p.

4. Taranenko M.E., Mal'tseva V.E. Upravleniye kachestvom rud. Sushchestvuyushchiye podkhody avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov na proizvodstve: uchebnoye posobiye [Existing Approaches to Automation of Technological Processes in Production: A Study Guide]. Staryy Oskol: TNT, 2024. 284 p.

5. Yefimova M.R., Petrova YE.V., Rumyantsev V.N. Obshchaya teoriya statistiki: uchebnik [General Theory of Statistics: textbook]. M.: INFRA-M, 2010. 416 p.



6. Gromyko G.L. Teoriya statistiki: uchebnik [Theory of statistics: textbook]. M.: INFRA-M, 2010. 160 p.
7. Shorokhova I.S., Kislyak N.V., Mariyev O.S. Statisticheskiye metody analiza [Statistical methods of analysis]. M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federatsii, Ural, feder. un-t. Yekaterinburg: Izd-vo Ural, un-ta, 2015. 300 p.
8. Ivanov YU.N. Ekonomicheskaya statistika: uchebnik [Economic statistics: textbook]. M.: INFRA-M, 2010. 584 p.
9. Taranenko M.E. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8328.
10. Taranenko M.E. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8371.
11. Windows Y., Tunuguntla D., Parker D. C.R.K. Numerical Modelling of Granular Flows: a Reality Check. Computational Particle Mechanics. 2016. V. 3. no. 3. pp. 311-332.
12. Dolgunin V., Kudi A., Ukolov A., Tuev M. Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles. Chemical Engineering Research and Design. 2017. no. 122. pp. 22-32.
13. Hill K., Tan D. Segregation in Dense Sheared Flows: Gravity, Temperature Gradients, and Stress Partitioning. J. Fluid Meeh. 2014. no. 756.0020pp. 54-88.

Дата поступления: 17.12.2025

Дата публикации: 24.01.2026