

## Table of Contents

Обсуждение задачи SCCP.....	1
1. План. Откуда он берётся?.....	1
а) Откуда эта информация берётся?.....	1
б) Какие типы заранее составленных планов встречаются?.....	3
Как на основе имеющихся в отделе наработок строить расписание?.....	3
2. Можем ли в разных ручьях разливать слябы разной ширины?.....	3
3. Почему в работе [1] время задержки между сериями (ранее они назывались заказами) не зависит от пары серий?.....	4
4. Откуда взять параметры для нашей постановки?.....	5
а) Время обработки плавки в конверторе.....	5
б) Скорость движения сталевого крана.....	5
в) Время подъёма и опускания плавки на мостовом кране.....	5
г) Скорость движения мостового крана.....	6
е) Размеры цеха у нас.....	6
5. Будут ли для оптимального расписания создаваться очереди из сталевого крана так, что некоторым плавкам (особенно – с УНРС 8 и 9) придётся ждать, чтобы попасть в свой крановой пролёт (см. рис. ниже)?.....	8
6. Имеются ли двухпозиционные ресурсы ВПО на НЛМК?.....	9
Литература.....	9

## Обсуждение задачи SCCP.

Во время обсуждения задачи SCCP 24 марта, были подняты интересные вопросы. Я исследовал литературу и др. открытые источники, поэтому теперь к части вопросов есть замечания и комментарии.

### 1. План. Откуда он берётся?

В работе [1] задано, на каком МНЛЗ хотим выполнять какую плавку и в какое время.

#### а) Откуда эта информация берётся?

В статье НЛМК [2] указывается, что **“Заказы поступают примерно за две-три недели в систему более высокого уровня, где кластеризуются, группируются, дефрагментируются и спускаются в цех в виде суточных планов.”** А далее уже строит расписание предлагаемая в статье система. Это делается из-за отсутствия возможности сразу просчитать расписание на несколько десятков смен вперёд на текущих вычислительных средствах.

Этот подход разделяется и в статье [4]: “The project uses the steelmaking plant in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex as the study background. The whole scheduling process consists of four steps:

- (1) cast sequencing which determines cast sequences and charge sequence in each cast;
- (2) sub-scheduling which fulfills the scheduling of individual charge sets;
- (3) rough scheduling which merges sub-schedules; and
- (4) optimal scheduling which eliminates machine conflicts. While the first three steps consider mainly the operation relationships and can be done relatively easily, the last step needs to consider resource constraints to ensure practical feasibility of the resulting schedule”.

Также важно отметить, что Cast во всех изученных работах – это не обязательно заказ (как я предполагал ранее), а это именно *серия выполняемых подряд, без перерывов, плавков*. Серии

строятся на шаге (1), начало исполнения каждой серии и МНЛЗ также выбираются на шаге (1).

Обязательно ли в серии одна марка стали? В работе [5] 1988 года утверждается, что нет, и похожие марки стали могут объединяться в одну литевную марку стали: “similar grades with overlapping tolerances of temperature and chemistry are combined into castable grade families. The number of cast families is only 15 to 20 percent of the number of actual steel grades.”

Также условие непрерывности серий очень важно во всех работах, исследующих СССР. Ведь, согласно работе [5], если серия разорвётся, то потратится время, примерно нужное на разлив 4 плавков: “caster turnaround: end the sequence, change the tundish (ковш/промковш или ковш, с которого сталь льётся на МНЛЗ), reset the casting machine, and begin a new sequence. A turnaround results in a productivity penalty, since the caster stops producing during that period.” и “A caster turnaround takes approximately the amount of time it takes to cast four heats. This casting downtime is time that is lost forever. Therefore, maximizing sequence length without sacrificing on-time delivery is a major objective”. Возможно, что сейчас, к 2023 году, это время стало меньше. Так, у заказчиков это занимало не 4, а только 2 плавки.

Вернёмся к работе [4]. В ней приведены следующие стадии построения расписания:

(1) Определяются последовательности плавков в каждой серии (eng. cast, ранее серия называлась заказом) и последовательности исполнения серий на МНЛЗ. Для этого нужно знать целевое время производства плавков. Видимо, на этом этапе, при построенных сериях, строим расписание разлива их на МНЛЗ, без учёта предыдущих этапов (конвертера и ВПО) “These can be considered as [single machine sequencing problems without resource constraints](#)” (? multiple machine sequencing?) [4].

(2) Далее строим расписание для каждой серии с учётом конвертера и ресурсов ВПО. Пример на рис. ниже.

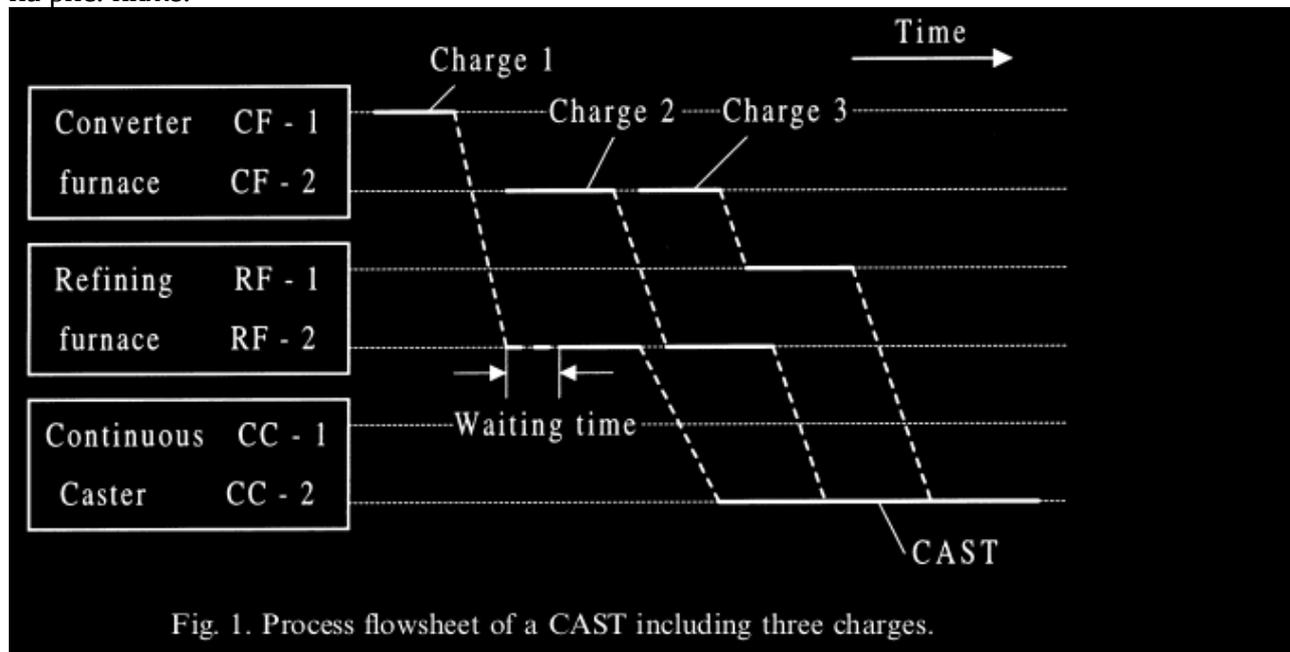


Fig. 1. Process flowsheet of a CAST including three charges.

Это можно делать, например, начиная с последней плавки серии так, чтобы очередная стадия исполнялась как можно позже.

(3)-(4). На этих шагах расписания с предыдущего шага сначала накладываются (с возможными конфликтами по ресурсам ВПО/конвертерам) (шаг 3), а затем эти конфликты по ресурсам удаляются (шаг 4). Эти шаги требуют больших вычислений.

## б) Какие типы заранее составленного планов встречаются?

В работе [3] 2021 года, заданы требуемые времена исполнения слябов, но не заданы МНЛЗ, на которых должны быть исполнены плавки.

Также в работе [7] предложен алгоритм для построения всего плана, но работа большая и трудная, с ней ещё буду разбираться.

## Как на основе имеющихся в отделе наработок строить расписание?

Считаю, что постановку Стаса (либо мою модификацию постановки заказчиков), дополнив её ограничениями на ресурсы ВПО и/или доступность конвертеров не посменно, а в каждый момент времени, можно использовать для построения расписания серий плавков на МНЛЗ.

Также можно поиграться с ограничениями:

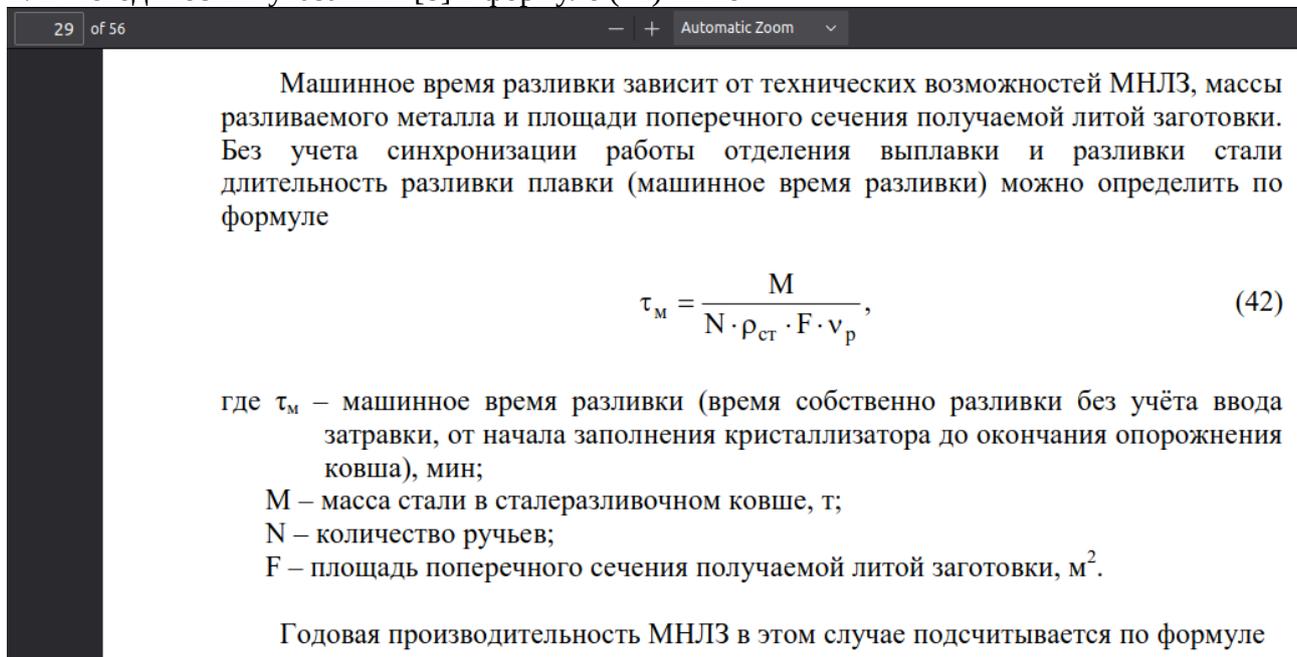
- (1) не учитываем ограничения ВПО и конвертер на стадии построения расписания
- (2) учитываем ограничения посменно (текущая модель)
- (3) учитываем ограничения в каждый момент времени

и выяснить, с какими ограничениями получается более качественное итоговое расписание.

## 2. Можем ли в разных ручьях разливать слябы разной ширины?

Существуют разные ответы на этот вопрос.

1. В методических указаниях [8] в формуле (42) ниже



29 of 56 Automatic Zoom

Машинное время разливки зависит от технических возможностей МНЛЗ, массы разливаемого металла и площади поперечного сечения получаемой литой заготовки. Без учета синхронизации работы отделения выплавки и разливки стали длительность разливки плавки (машинное время разливки) можно определить по формуле

$$\tau_m = \frac{M}{N \cdot \rho_{ст} \cdot F \cdot v_p}, \quad (42)$$

где  $\tau_m$  – машинное время разливки (время собственно разливки без учёта ввода затравки, от начала заполнения кристаллизатора до окончания опорожнения ковша), мин;  
 $M$  – масса стали в сталеразливочном ковше, т;  
 $N$  – количество ручьев;  
 $F$  – площадь поперечного сечения получаемой литой заготовки, м<sup>2</sup>.

Годовая производительность МНЛЗ в этом случае подсчитывается по формуле

предполагается, что площадь  $F$  поперечного сечения заготовки на каждом из ручьев одинаковая. Вероятно, это обусловлено одинаковой формой поперечного сечения сляба. Хотя, это учебный курс и разная геометрия слябов из разных ручьев может просто не рассматриваться в курсе.

2. В работе [5] от 1988 есть 2 ручья на МНЛЗ (strands) с фиксированной высотой сляба, но ширина сляба может быть разной: “The goal is to cast widths on the two strands that maintain an aggregate casting width of 110 to 120 inches to maintain caster synchronization with the furnace. The ideal way to maintain an aggregate width from 110 to 120 inches is to schedule slab widths that run from wide to narrow on one strand and narrow to wide on the other strand”. Вкратце, они льют короткие слябы с длинными одновременно на разных ручьях одной МНЛЗ. Хотя, ввиду 35-летнего возраста работы, описывающей американскую фабрику, у нас может быть другое устройство МНЛЗ.

В нашем случае можно, в предположениях о том, что плавка вывозится в порту за смену целиком, а не по частям, преобразовать случай с различными геометриями ручьёв в случай с одинаковыми. Сделаем это таким образом.

Скажем, что плавки разливаются параллельно, если плавки разливаются в разных ручьях одной МНЛЗ одновременно.

(0) Зафиксируем плавку  $p$ .

(1) Рассмотрим все плавки, выполняемые параллельно с  $p$  параллельно,

(2) Выберем плавки, выполняемые параллельно со всеми плавками с предыдущего шага

(3) Повторяем шаг (2), пока не перестанем получать новые плавки (поиск в ширину).

Получим множество  $P$  плавков. Далее упорядочим плавки из  $P$  по времени погрузки в порт на ж/д пути. Заменяем параллельные разливы ковшей (один ковш для нескольких плавков из  $P$ ) на МНЛЗ на непараллельную разливку плавков (один ковш – одна плавка) из уже упорядоченного множества  $P$ . При этом самый ранний по времени ковш заменяется на первую плавку из  $P$ , ..., самый поздний – на последнюю. При этом плавки *целиком* не станут позже приезжать на склад, или раньше с него уезжать. Поэтому не переполнив склад и не опоздав отправить плавки в порты, можно преобразовать случай с различными геометриями ручьёв в случай с одинаковыми. Длины серий также не укоротятся, т.к. все плавки из  $P$  могут быть разлиты за одну серию.

### **3. Почему в работе [1] время задержки между сериями (ранее они назывались заказами) не зависит от пары серий?**

В предыдущей работе тех же авторов [6] время задержки зависит от пары серий, в работе же [5] написано, что при разрыве серии происходят одинаковые операции, занимающие время примерно 4 плавков: “A caster turnaround takes approximately the amount of time it takes to cast four heats. This casting downtime is time that is lost forever. Therefore, maximizing sequence length without sacrificing on-time delivery is a major objective”. С другой стороны, в работе [5] не меняют высоту слябов, а только ширину.

Мне вопрос о том, различные или одинаковые времена задержки между парами серий, представляется несущественным в случае решения задачи СССР методом решения задачи смешанного ЦЛП, т.к. преобразовать постановку с одинаковыми временами задержки к постановке с разными временами задержки нетрудно (см. работы [6] и [1]). Также одинаковые времена задержки между сериями могут возникать в случае, когда МНЛЗ разливают слябы одинаковой высоты.

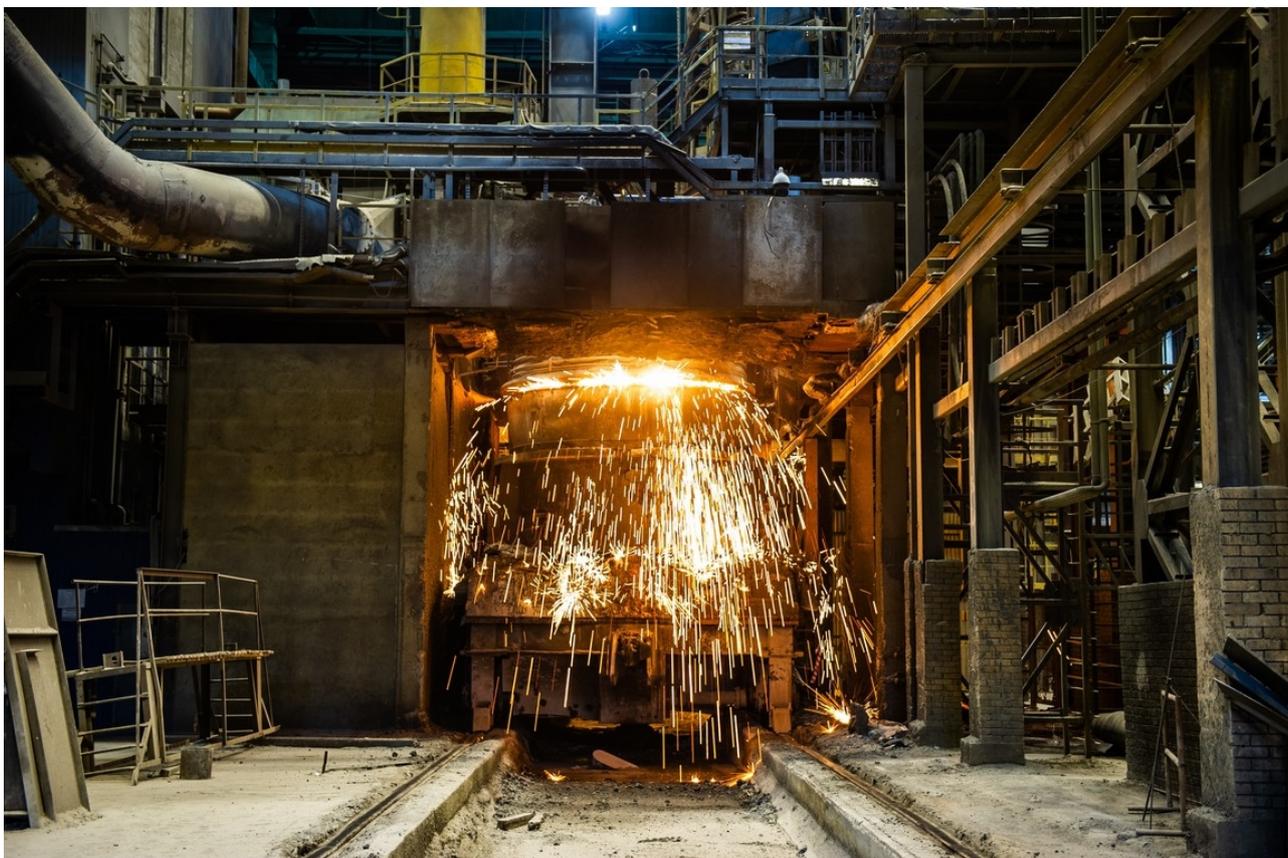
## 4. Откуда взять параметры для нашей постановки?

### а) Время обработки плавки в конвертере.

В [2] написано, что плавка в конвертере занимает около 40 мин.: “Конвертеров у нас три штуки, они могут подавать «бульон» в любое время и по заданному расписанию. При этом если процесс окисления запущен, мы не можем его остановить, в любом случае на выходе примерно через 40 минут получится ковш расплава, с которым надо будет что-то делать”. В статье [9] от 2019 г. написано, что плавка занимает ровно 43 минуты: “Начинается процесс конвертерной плавки. Через 43 минуты конвертерная плавка завершится.”

### б) Скорость движения сталевоза.

На рис. ниже



сталь едет в сталевозе.

По [ссылке](#) можно узнать, что скорость сталевоза составляет около **3 км/ч**. Это – типичная скорость сталевоза (также встречал значение 1 м/с, или 3.6 км/ч для сталевоза меньшего размера).

### в) Время подъёма и опускания плавки на мостовом кране.

Есть [видео](#) [10] с комбината в Волгоградской области. Там видно, что подъём плавки идёт с 19:10 до 20:00, т.е. занимает около 1 мин. Можно считать, что и опускание плавки занимает столько же времени. Это согласуется с тем, что в [11] считают, что время транспортировки между стадиями пренебрежимо мало по сравнению с временем исполнения плавки на ресурсах ВПО/конвертере или разливки “Transportation time between any two successive stages is negligible”.

### г) Скорость движения мостового крана.

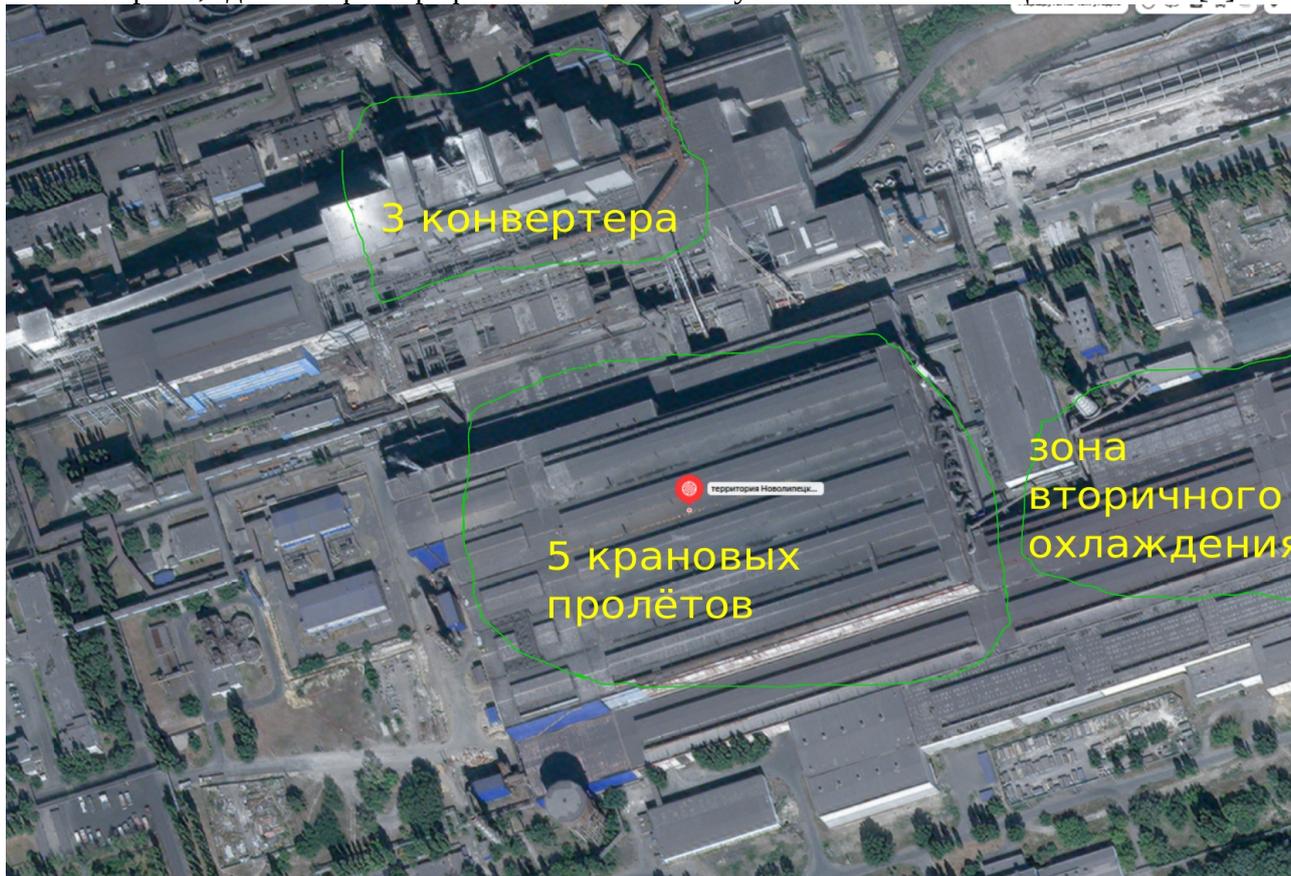
Согласно [сайту](#): “Скорости передвижения мостовых кранов колеблются в довольно широких пределах 60—125 м/мин. В тех случаях, когда электрический кран обслуживается с полу, скорость передвижения моста не должна превышать 40 м/мин”.

Впрочем, скорость нужно сократить в 1.5-2 раза из-за того, что в конвертерном цеху часто приходится поднимать ковш во время движения, как видно на 20:45 в [видео](#) [10].

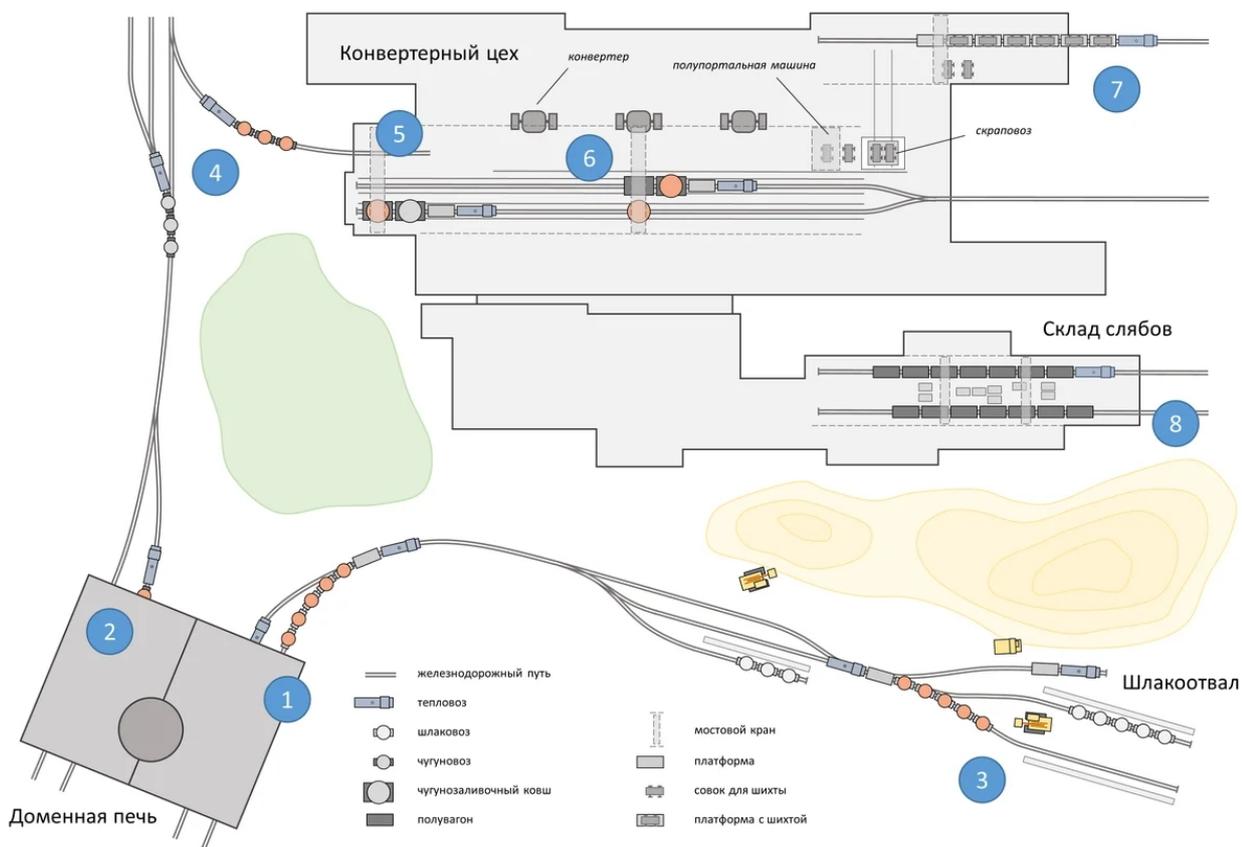
### е) Размеры цеха у нас

Для их определения, найдём [цех на карте](#) (заметим, что на карте конвертерный цех показан, как узкое, по меркам металлургии, здание шириной 30 м.).

В то же время, здание с фотографии ниже соответствует как описанию КЦ-2 из статьи [2]:

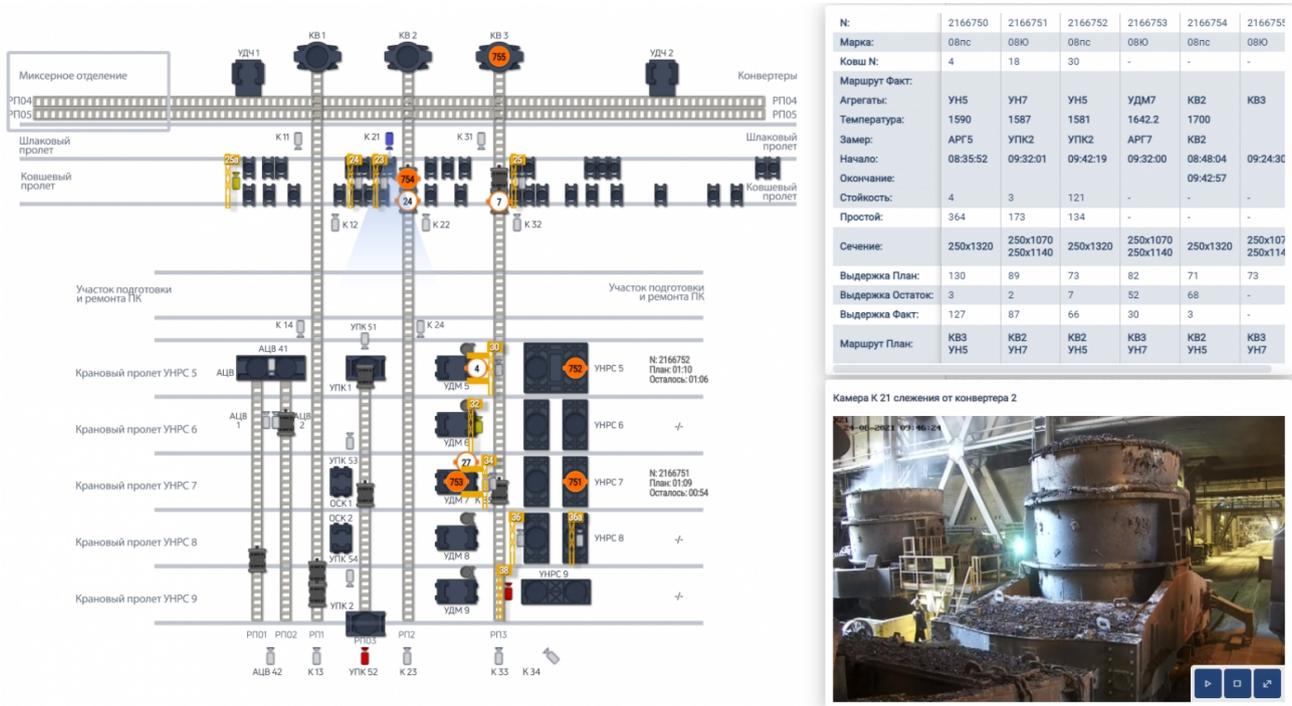


, так и схеме ж/д путей из статьи [9]:



Предлагаю вычислять все оставшиеся параметры цеха, такие как время движения между конвертерами, ресурсами ВПО и МНЛЗ, исходя из размеров КЦ-2 и скорости движения сталевоза или мостового крана. Так, например, от конвертера до кранового пролёта сталевоз будет двигаться в районе 4-5 мин.

## 5. Будут ли для оптимального расписания создаваться очереди из стелевозов так, что некоторым плавкам (особенно – с УНРС 8 и 9) придётся ждать, чтобы попасть в свой крановой пролёт (см. рис. ниже)?



Считаю, что это может иногда проблемой только для УНРС 9. Так как

- 1) в одном крановом пролёте может быть несколько стелевозов (см. крановой пролёт УНРС 9, рельсы от КВ 1 на рис. выше, где помещается 2 стелевоза)
- 2) стелевоз должен стоять в своём пролёте только то время, пока с него кран не снял ковш. Ковш может ждать очереди, видимо, и не занимая стелевоза, см. рис. ниже. Рельсов или стелевоза под ковшом не видно.



## 6. Имеются ли двухпозиционные ресурсы ВПО на НЛМК?

Ответ: да, имеются. По ссылке <https://smt-nlmc.ru/projects/50/> есть новость о том, что на НЛМК в конвертерном цехе КЦ-2 (где мы и строим расписание), сооружён двухпозиционный циркулярный вакууматор.

## Литература.

- [1] Cui, Haijuan, Xiaochuan Luo, and Yuan Wang. "Scheduling of steelmaking-continuous casting process with different processing routes using effective surrogate Lagrangian relaxation approach and improved concave-convex procedure." *International Journal of Production Research* 60.11 (2022): 3435-3460. Ссылка: [https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Scheduling\\_of\\_steelmaking-continuous\\_casting\\_process\\_with\\_different\\_processing\\_routes\\_using\\_effective\\_surrogate\\_Lagrangian\\_relaxation\\_approach\\_and\\_improved\\_concave%20%80%93convex\\_procedure\\_-\\_2021.pdf](https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Scheduling_of_steelmaking-continuous_casting_process_with_different_processing_routes_using_effective_surrogate_Lagrangian_relaxation_approach_and_improved_concave%20%80%93convex_procedure_-_2021.pdf)
- [2] <https://habr.com/ru/company/nlmc/blog/580270/> , 2021 год
- [3] Hong, Juntaek, et al. "An iterated greedy matheuristic for scheduling in steelmaking-continuous casting process." *International Journal of Production Research* 60.2 (2022): 623-643. ссылка: [https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:12\\_2021\\_SCCP\\_with\\_no\\_by\\_C\\_C\\_plan.pdf](https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:12_2021_SCCP_with_no_by_C_C_plan.pdf)
- [4] Tang, Lixin, et al. "A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production." *European Journal of Operational Research* 120.2 (2000): 423-435. Ссылка:

[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799000417?casa\\_token=3f7wk89drioAAAAA:rJwHgO25rAvgPtXYwGT63lr40uFP\\_5HViYUkIHUoJGJYqnO876hL61uuslLSeqqXawAbse8eEEY](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221799000417?casa_token=3f7wk89drioAAAAA:rJwHgO25rAvgPtXYwGT63lr40uFP_5HViYUkIHUoJGJYqnO876hL61uuslLSeqqXawAbse8eEEY)

[5] Box, Richard E., and Donald G. Herbe Jr. "A scheduling model for LTV Steel's Cleveland Works' twin strand continuous slab caster." *Interfaces* 18.1 (1988): 42-56.

[6] Cui, Haijuan, and Xiaochuan Luo. "An improved Lagrangian relaxation approach to scheduling steelmaking-continuous casting process." *Computers & Chemical Engineering* 106 (2017): 133-146. Ссылка на описание: [https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:01%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%B7%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B8\\_SCCP\\_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BC\\_%D1%83%D0%BB%D1%83%D1%87%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B9\\_%D0%9B%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%B9\\_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8\\_2017\\_%D0%9E%D0%9F%D0%98%D0%A1%D0%90%D0%9D%D0%98%D0%95.pdf](https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:01%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%B7%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B8_SCCP_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BC_%D1%83%D0%BB%D1%83%D1%87%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D0%9B%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8_2017_%D0%9E%D0%9F%D0%98%D0%A1%D0%90%D0%9D%D0%98%D0%95.pdf)

[7] Missbauer, Hubert, Wolfgang Hauber, and Werner Stadler. "A scheduling system for the steelmaking-continuous casting process. A case study from the steel-making industry." *International Journal of Production Research* 47.15 (2009): 4147-4172. Ссылка: [https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:A\\_scheduling\\_system\\_for\\_the\\_steelmaking\\_-\\_Continuous\\_casting\\_process\\_%E2%80%94\\_A\\_case\\_study\\_from\\_the\\_steel-making\\_industry\\_%E2%80%94\\_2009.pdf](https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:A_scheduling_system_for_the_steelmaking_-_Continuous_casting_process_%E2%80%94_A_case_study_from_the_steel-making_industry_%E2%80%94_2009.pdf)

[8] А. Н. Шаповалов, Расчёт параметров непрерывной разливки стали, 2013. Ссылка: [http://nf.misis.ru/download/mt/Rachet\\_parametrov\\_nepnerivnoi\\_razlivki\\_stali.pdf](http://nf.misis.ru/download/mt/Rachet_parametrov_nepnerivnoi_razlivki_stali.pdf)

[9] <https://dzen.ru/a/XR0VcLlu9QCuJTRp>, 2019 год.

[10] Видео крановщика из КЦ в Волгоградской области: <https://www.youtube.com/watch?v=aY7lEdAdtdY>.

[11] Han, Dayong, et al. "An Improved Migrating Birds Optimization Algorithm for a Hybrid Flow Shop Scheduling within Steel Plants." *Mathematics* 8.10 (2020): 1661. Ссылка: [https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:An\\_Improved\\_Migrating\\_Birds\\_Optimization\\_Algorithm\\_for\\_a\\_Hybrid\\_Flow\\_Shop\\_Scheduling\\_within\\_Steel\\_Plants\\_%E2%80%94\\_2020.pdf](https://discopal.ispras.ru/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:An_Improved_Migrating_Birds_Optimization_Algorithm_for_a_Hybrid_Flow_Shop_Scheduling_within_Steel_Plants_%E2%80%94_2020.pdf)

[12] Подробно про устройство агрегата печь-ковш на НЛМК в КЦ-2: [https://vuzdoc.org/41285/tehnika/osnovnoe\\_oborudovanie\\_agregata\\_pech\\_kovsh\\_nlmk](https://vuzdoc.org/41285/tehnika/osnovnoe_oborudovanie_agregata_pech_kovsh_nlmk)