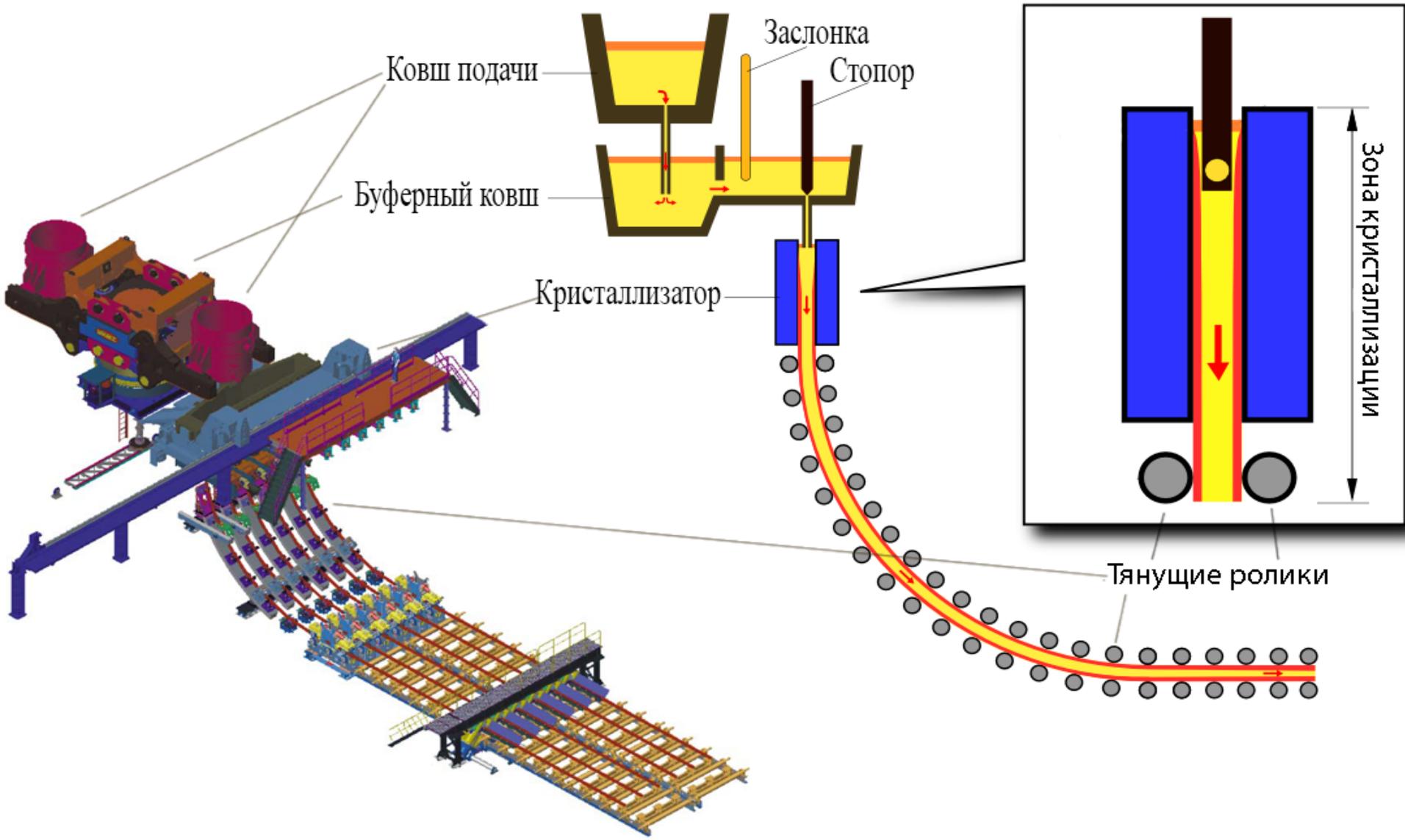


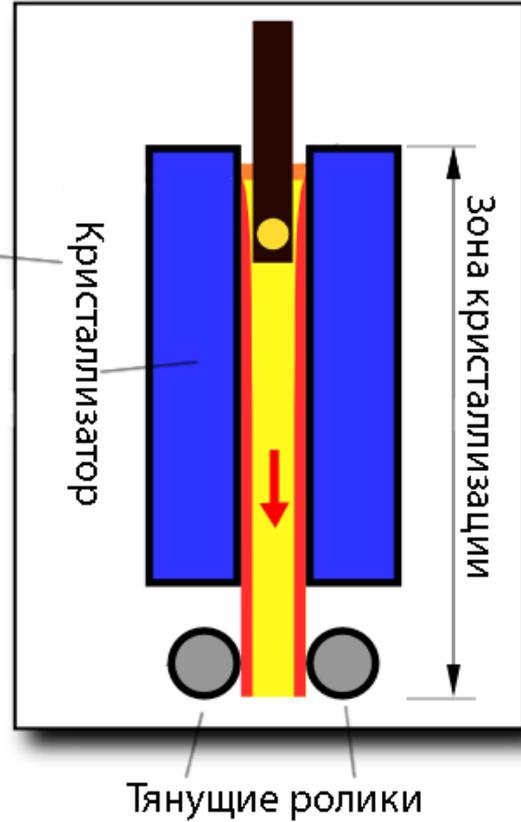
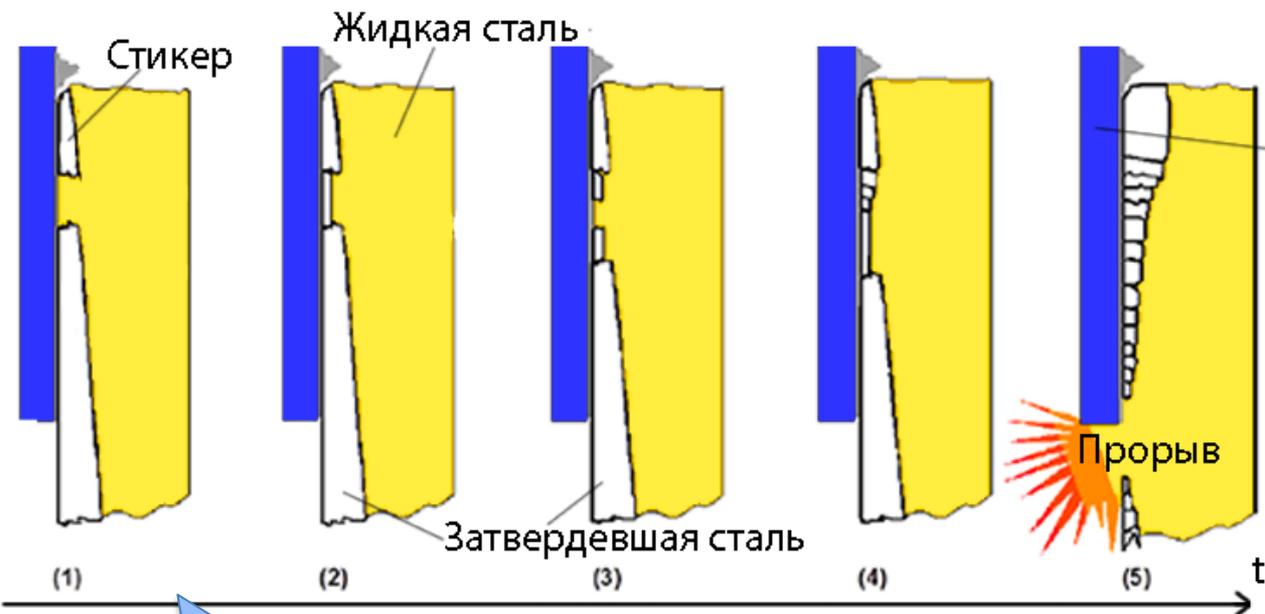
**Определение налипания
в процессе непрерывного литья
на основе использования
нейронной сети**

А.Р. Файзуллин, М.Л. Цымблер

Система непрерывного литья

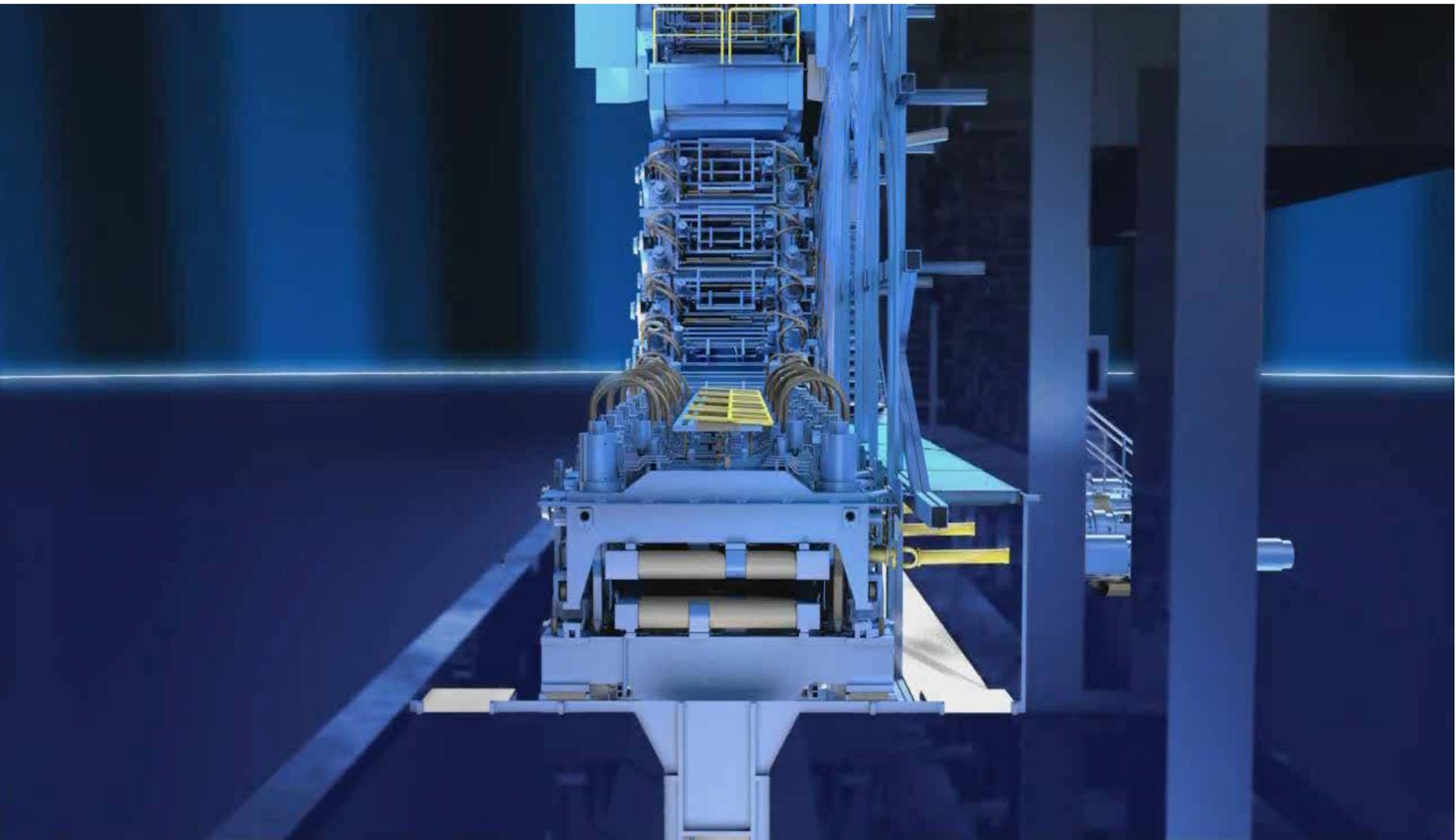


Прорыв из-за налипания

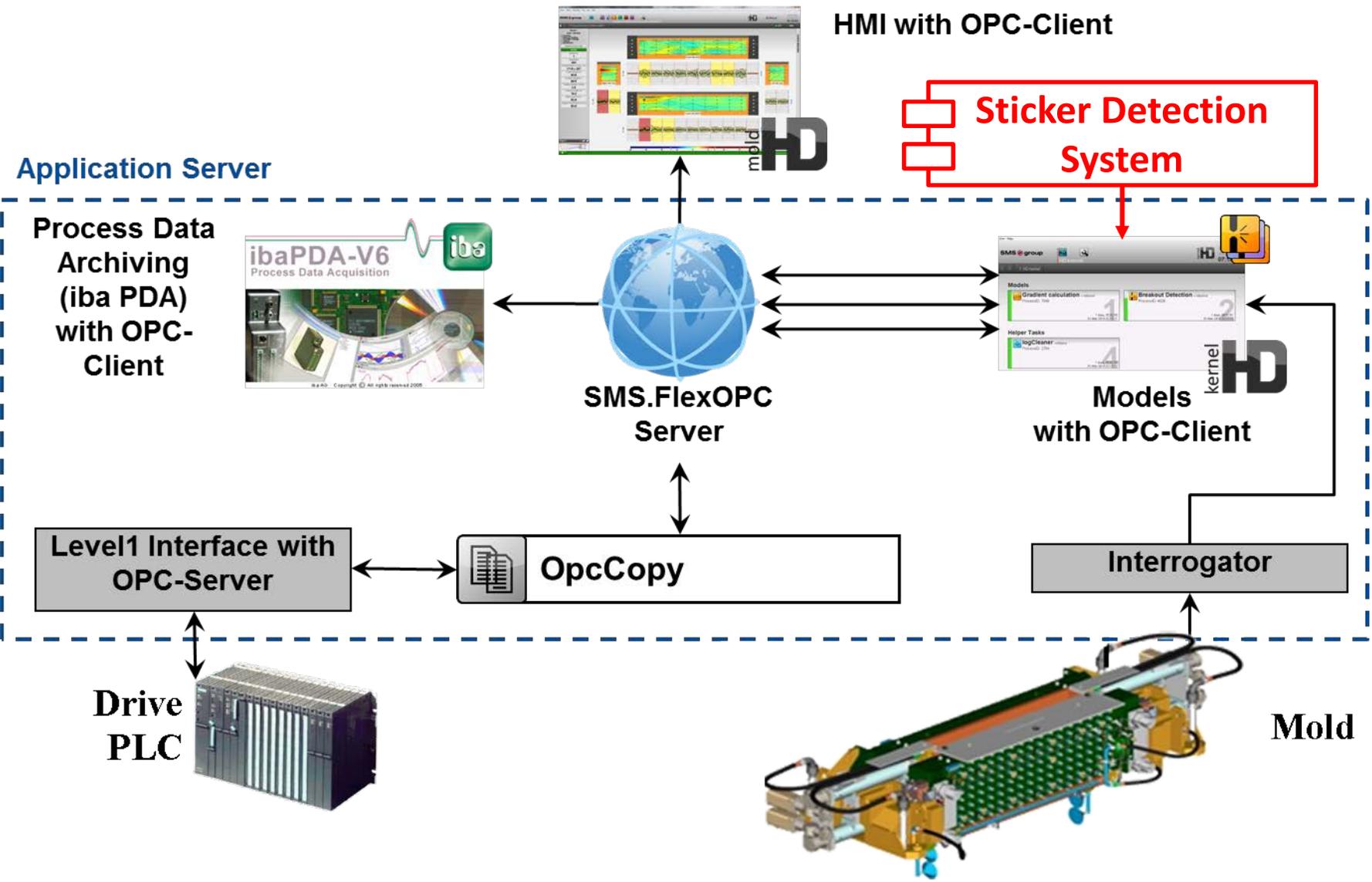


€250 000

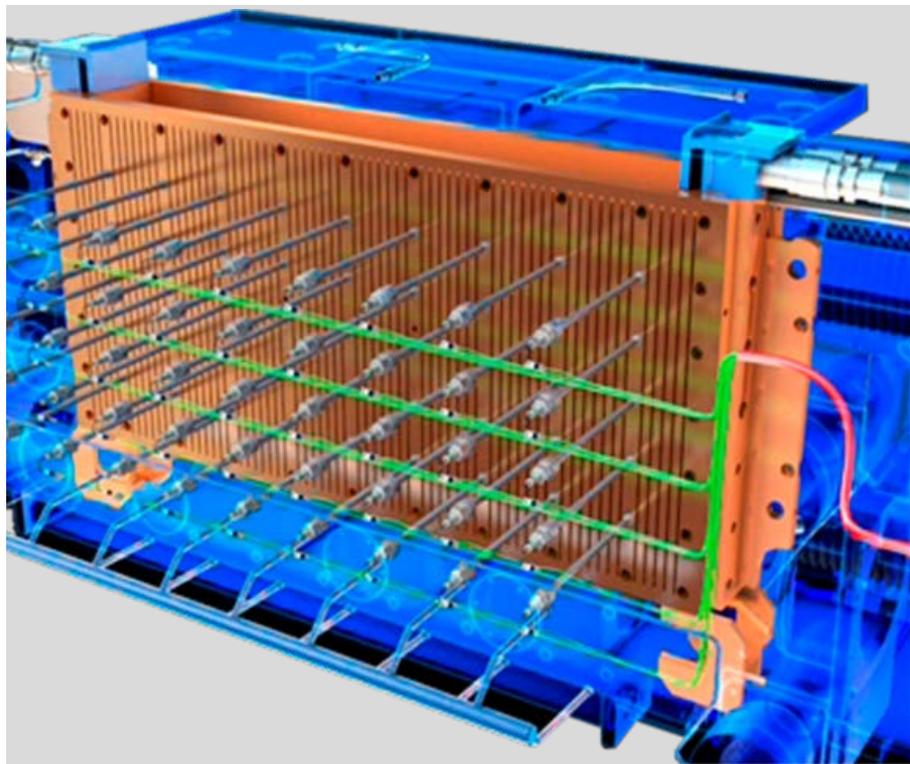
Процесс непрерывного литья



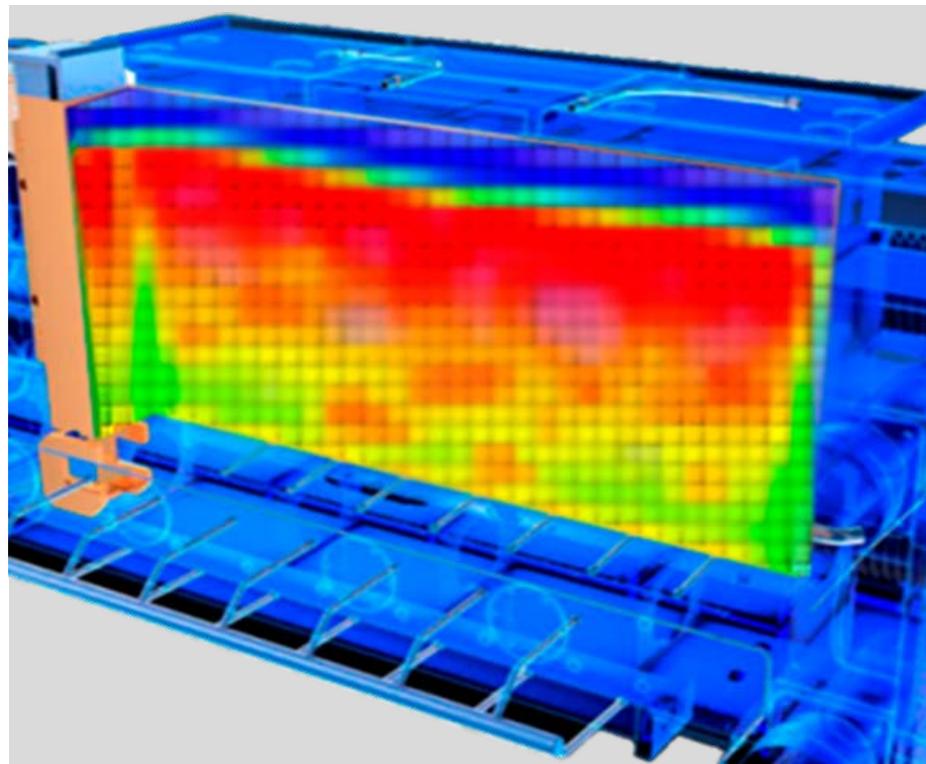
Система мониторинга HD mold



Кристаллизатор



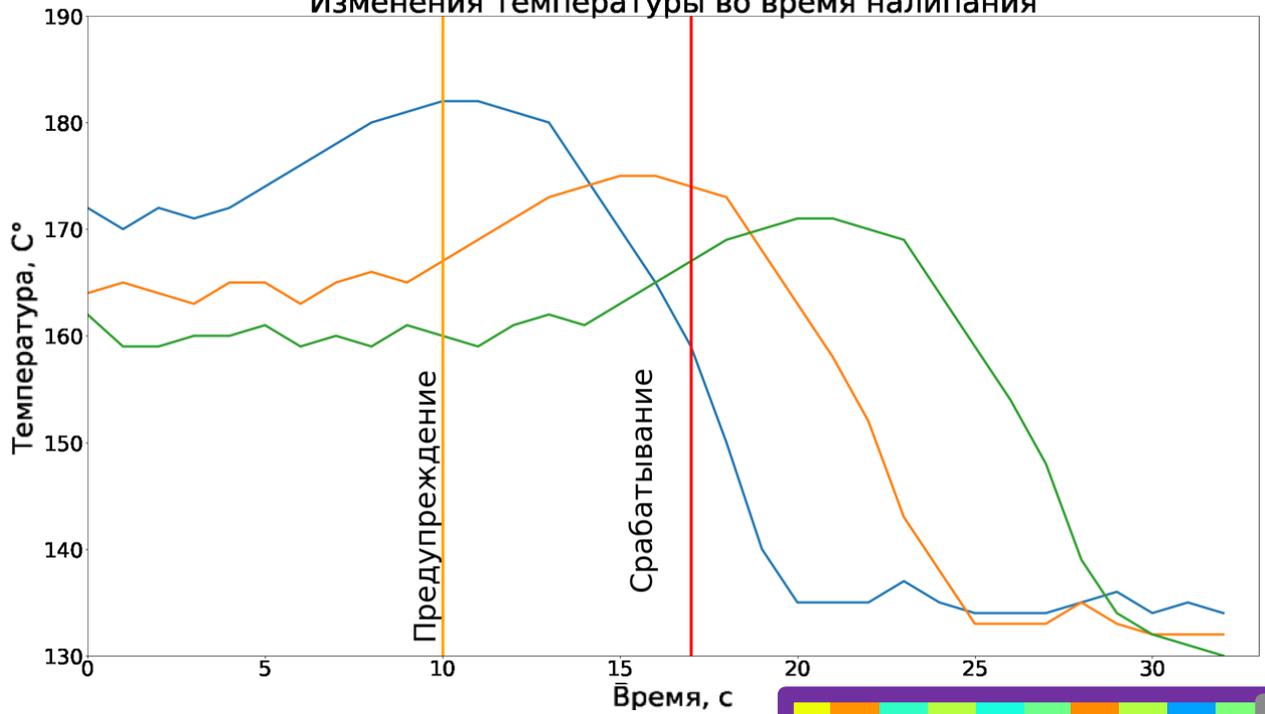
576 оптоволоконных
температурных
сенсоров



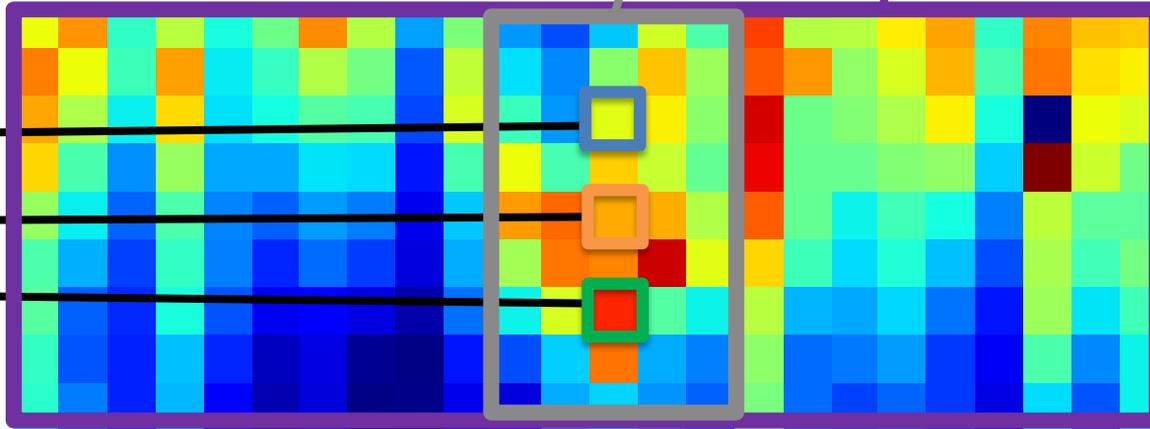
Тепловая карта
поверхности
кристаллизатора

Паттерн налипания

Изменения температуры во время налипания



- Датчик 1
- Датчик 2
- Датчик 3



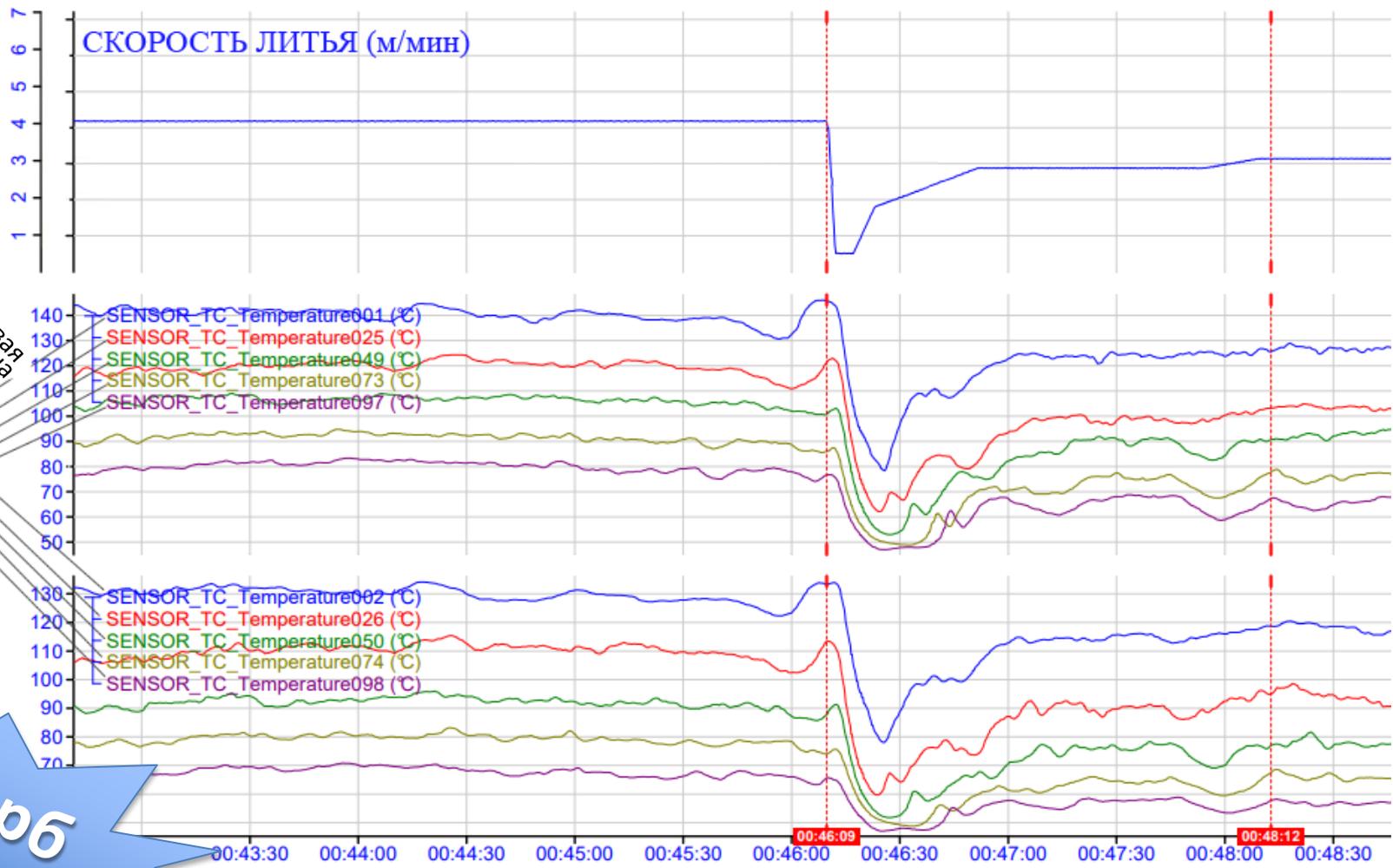
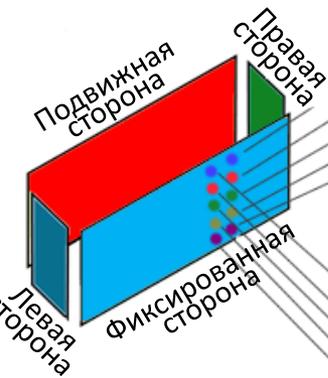
Зона налипания

Тепловая карта кристаллизатора

Пример ложного срабатывания

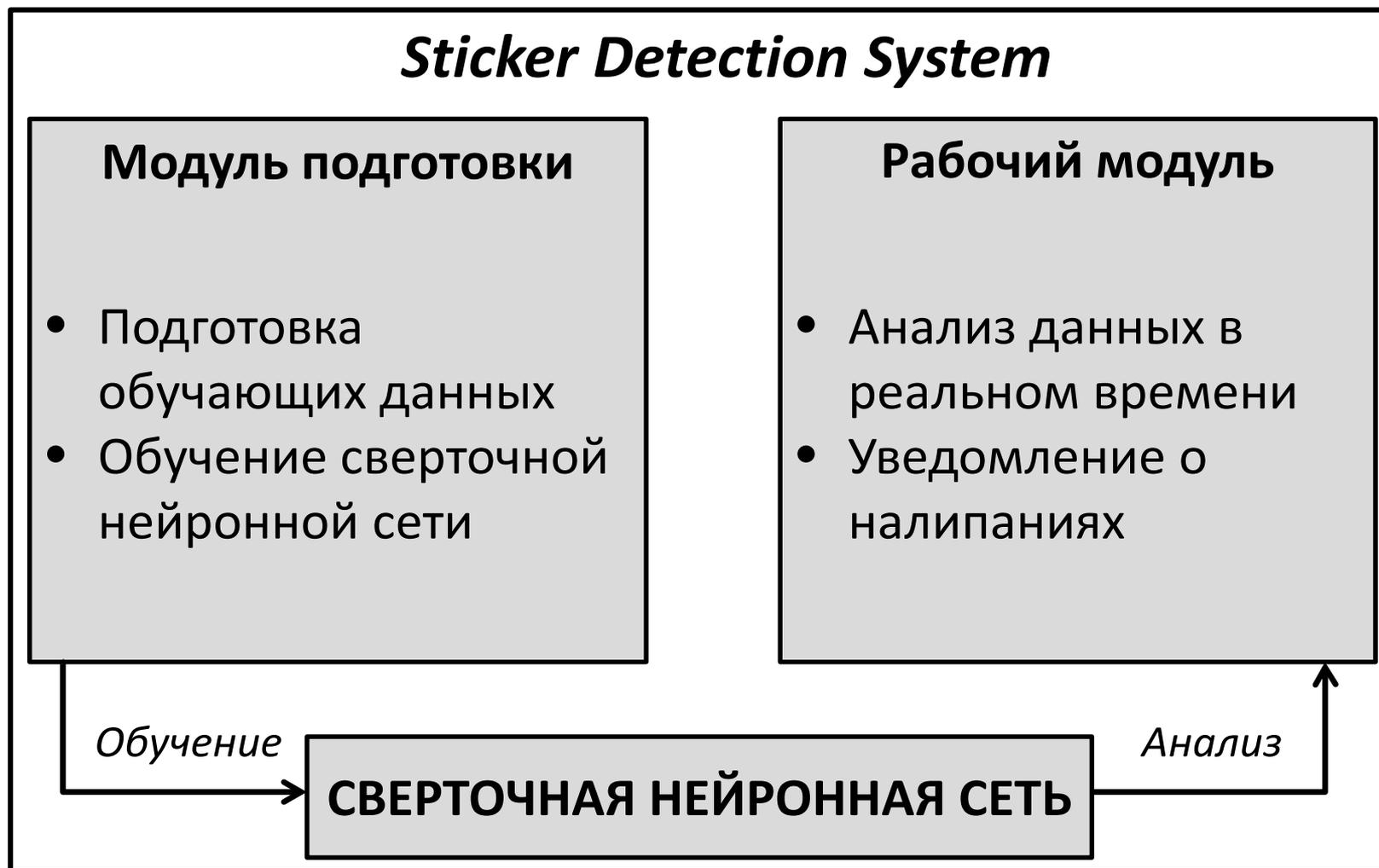


Каждое срабатывание оценивается экспертом

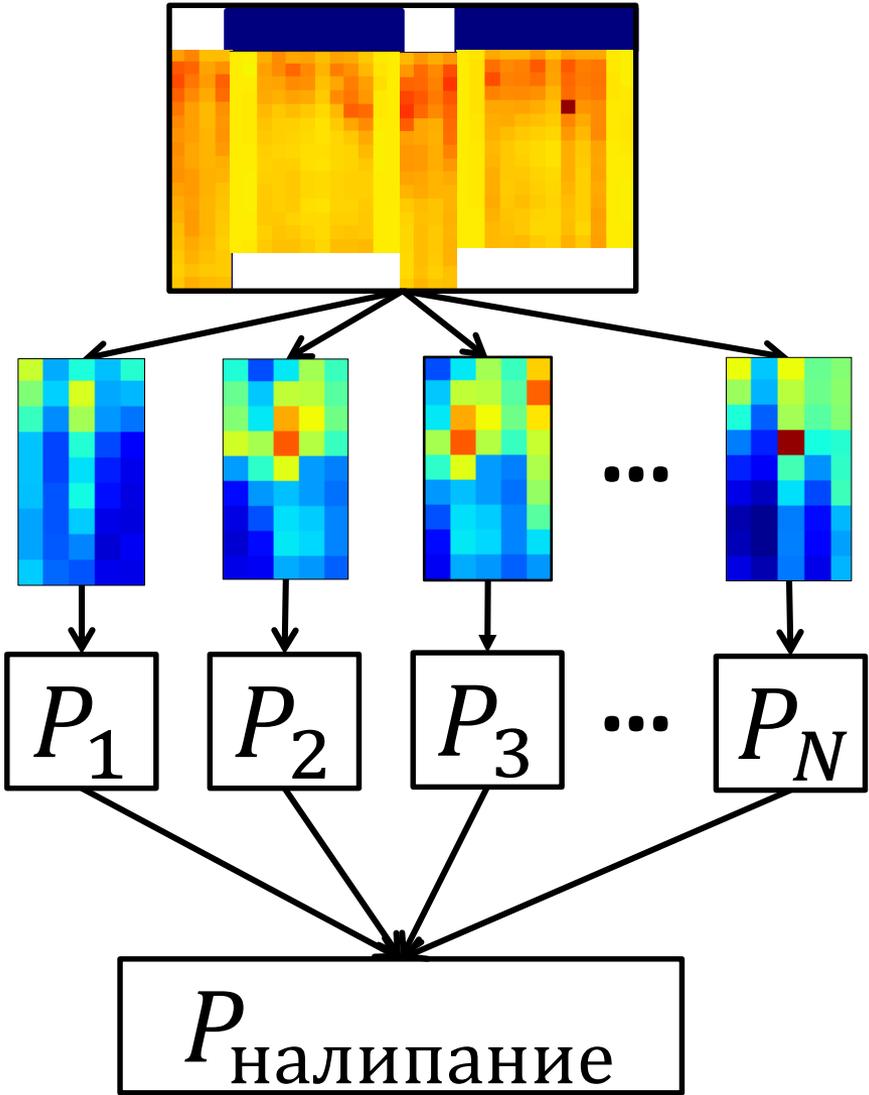
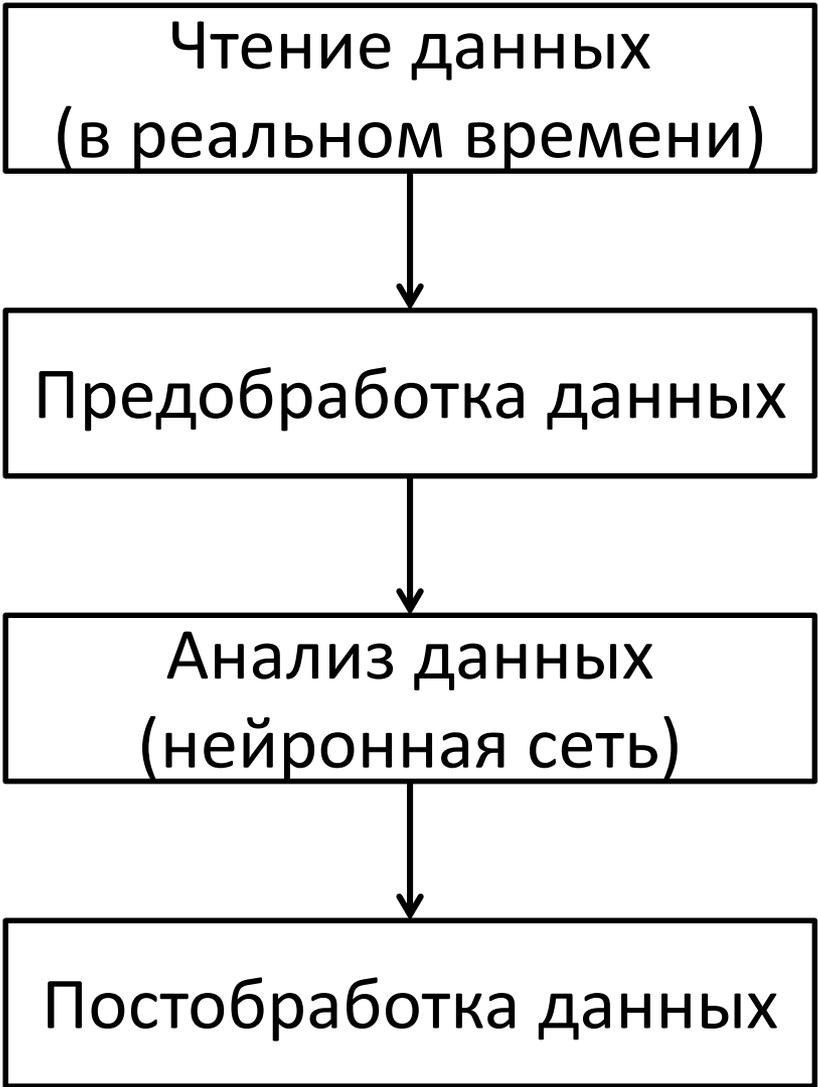


Ущерб €1 000+

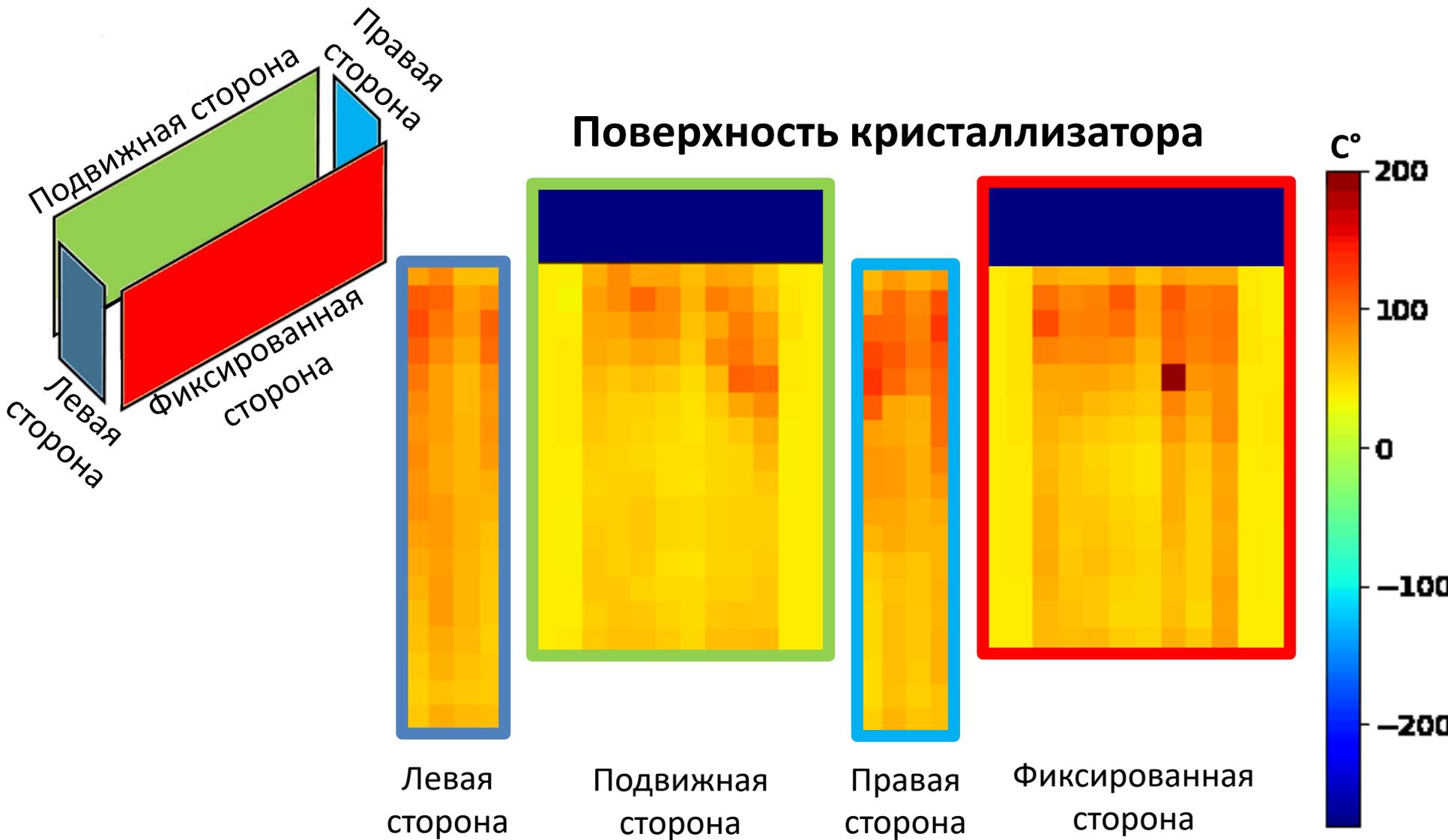
Система определения налипаний



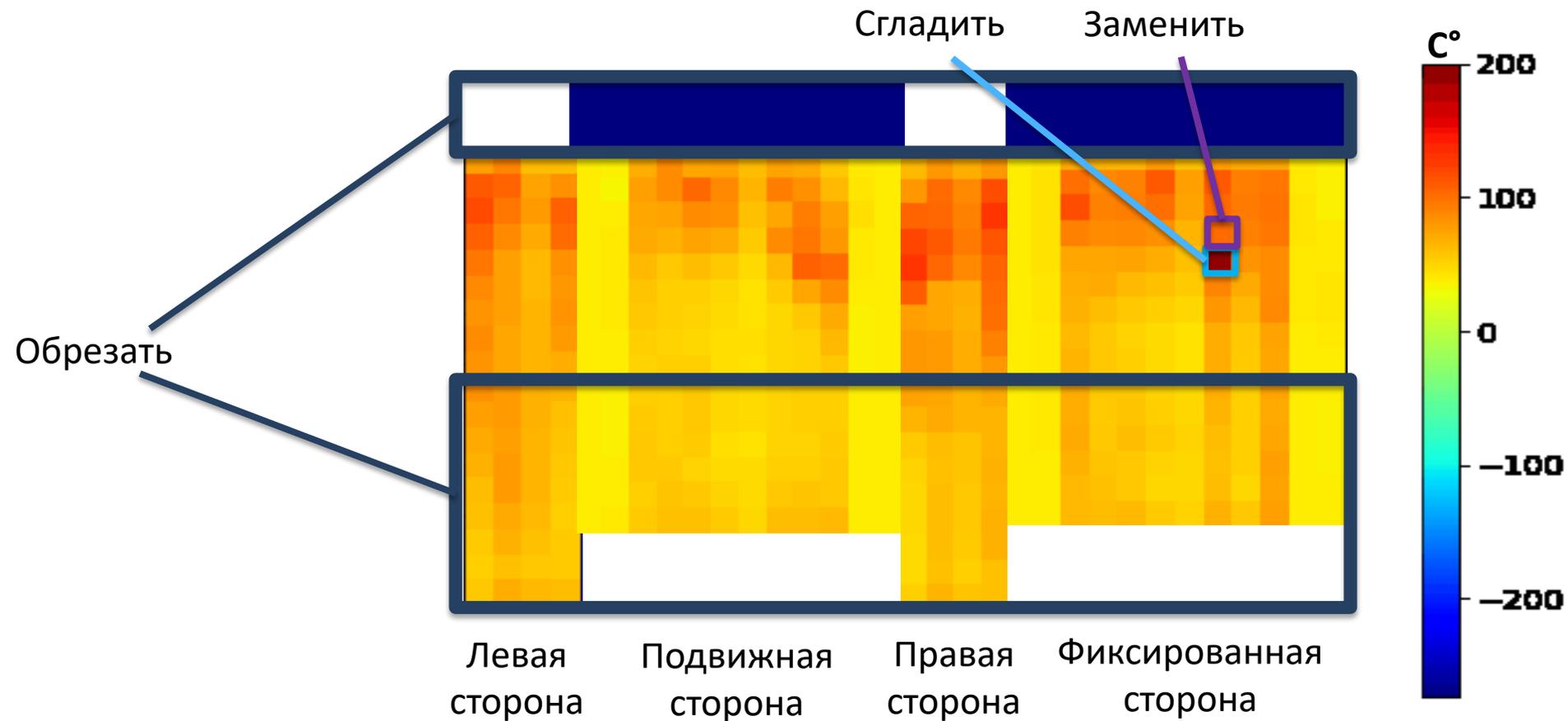
Обработка данных



Чтение данных



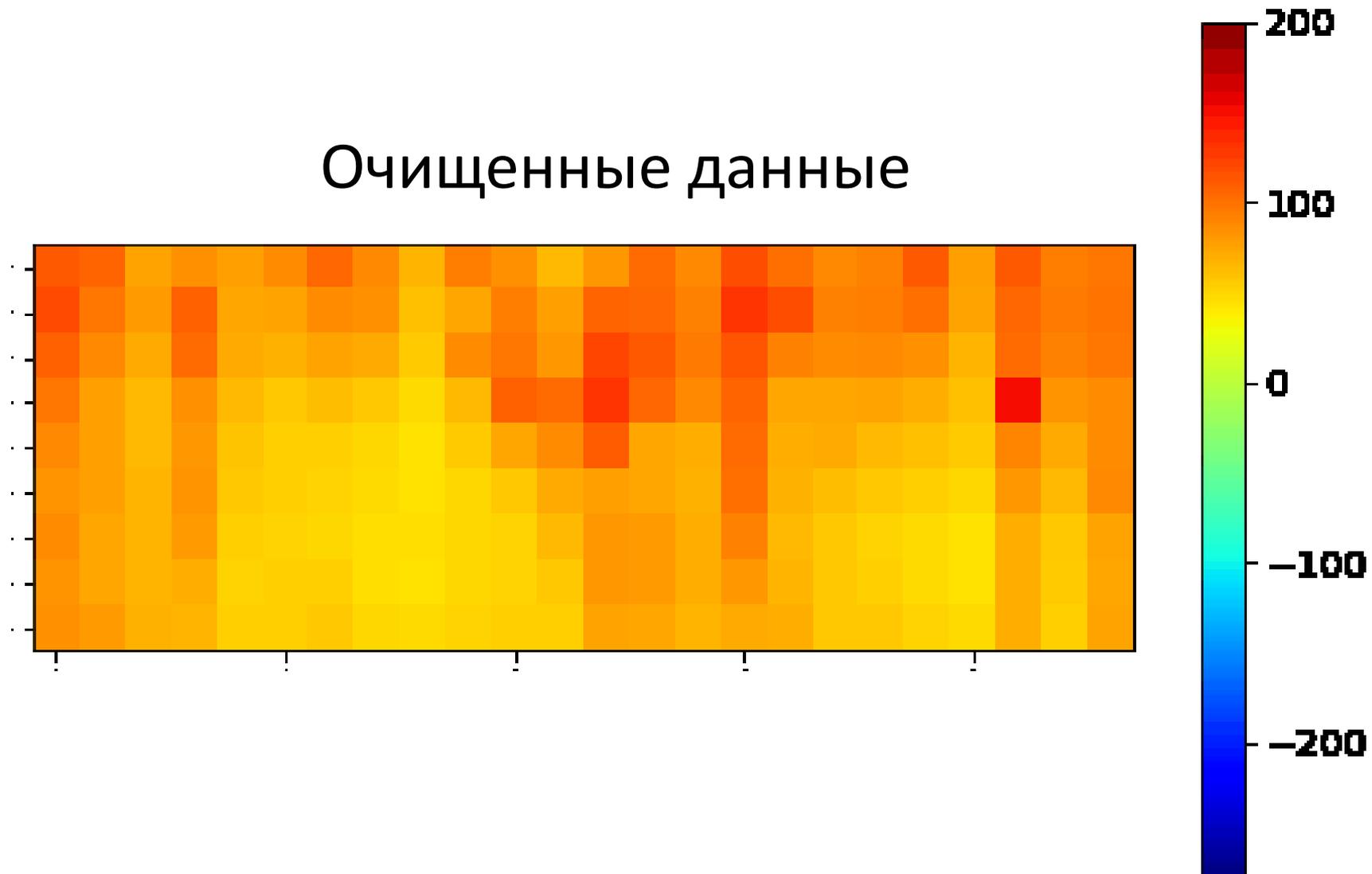
Очистка



Сглаживание:

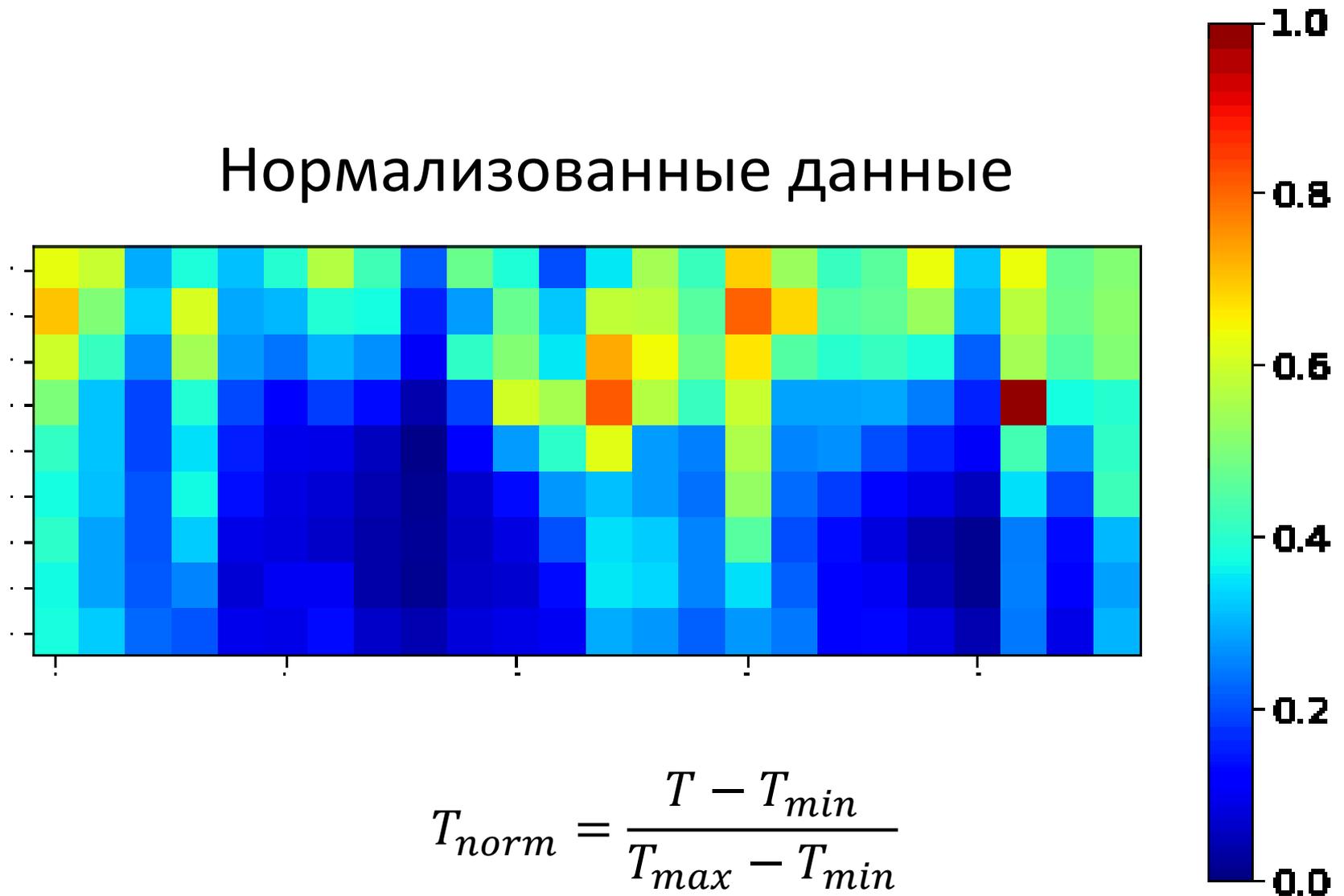
$$T = \min(\max(T, T_{avg} - \delta), T_{avg} + \delta)$$

Очищенные данные



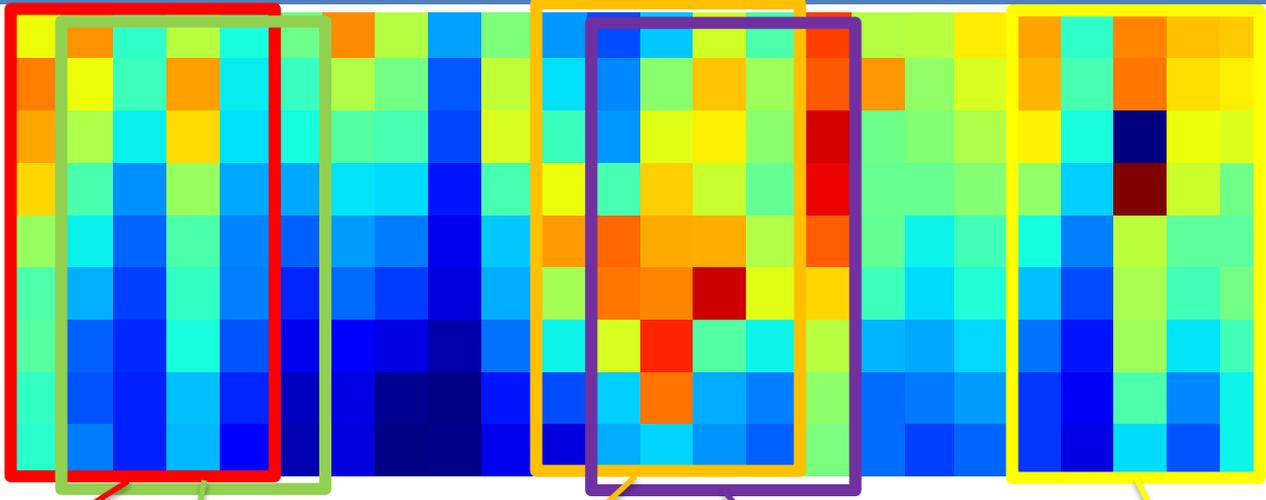
Нормализация

Нормализованные данные



$$T_{norm} = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

Нарезка



Образец #1

Образец #2

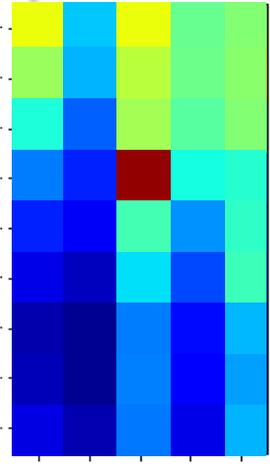
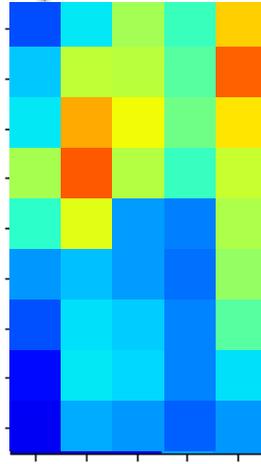
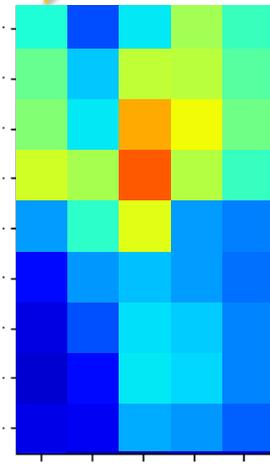
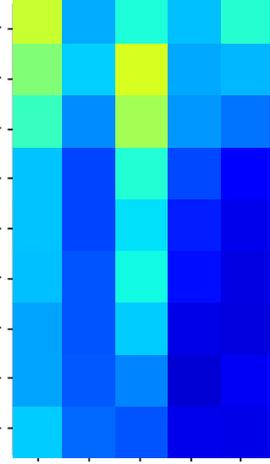
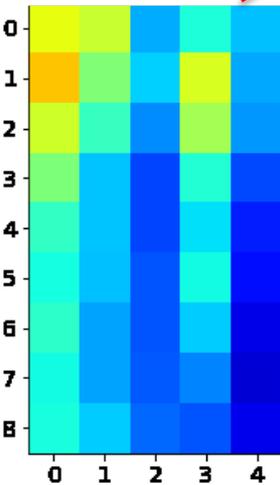
...

Образец #11

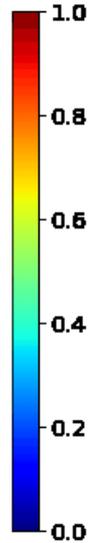
Образец #12

...

Образец #20

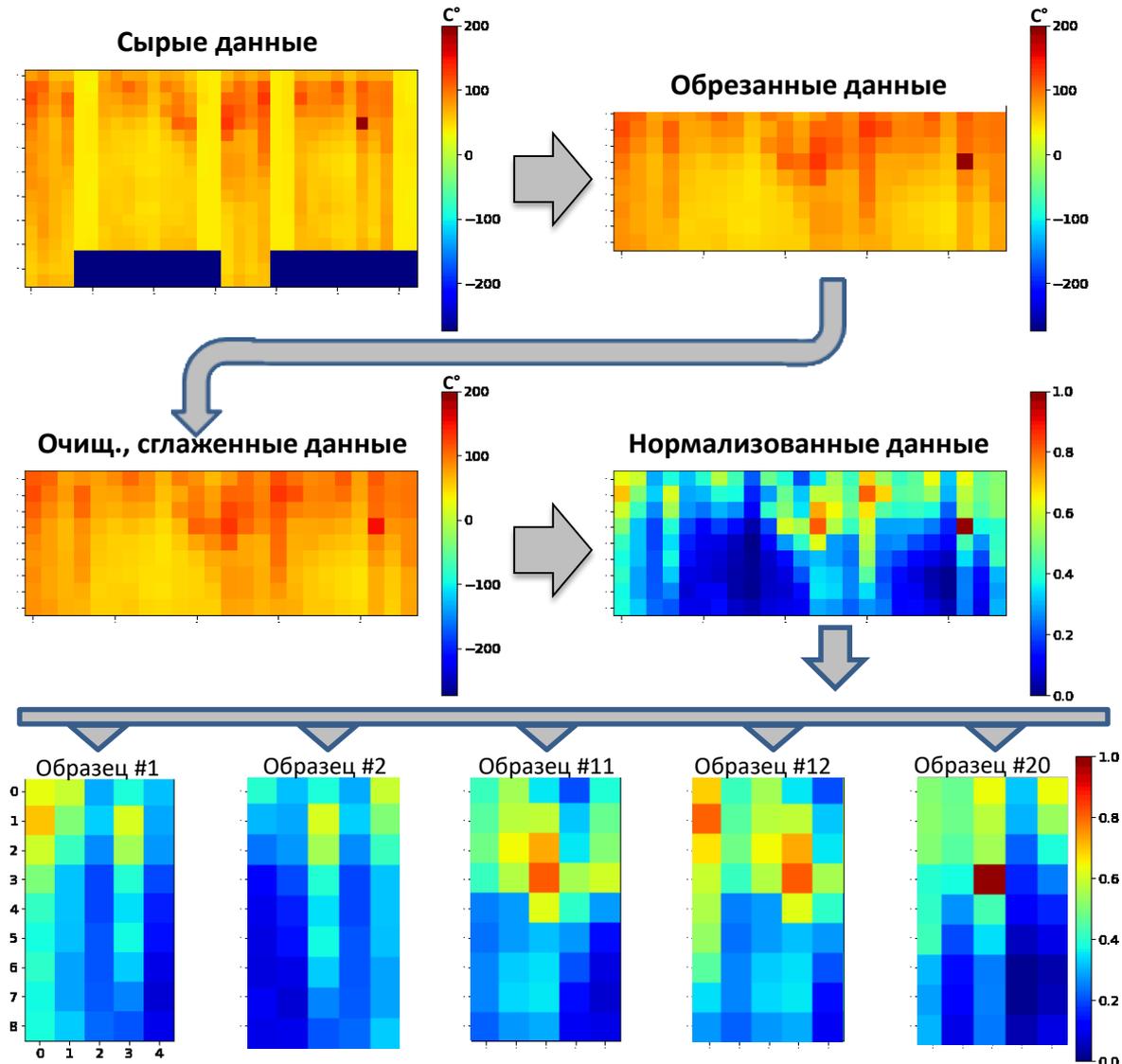


Налипание



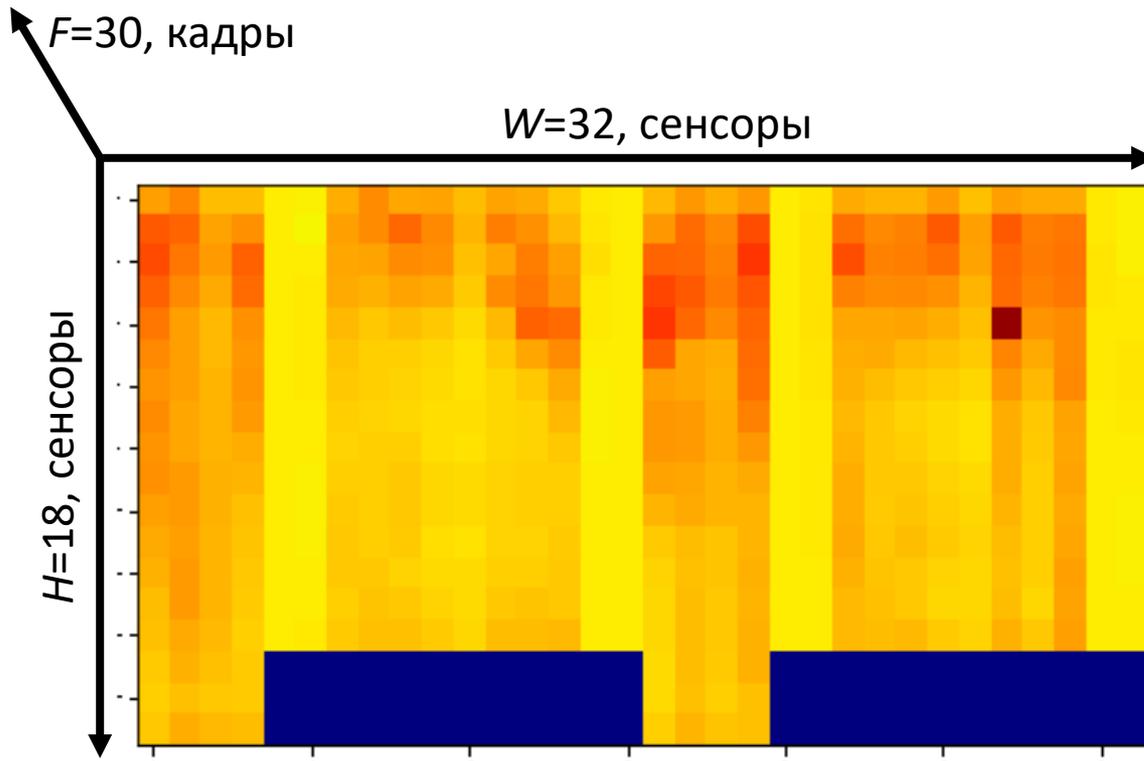
Подготовка данных

1. Прочитать данные и преобразовать в прямоугольник
2. Обрезать данные неактивных сенсоров
3. Очистить и сгладить значения температур
4. Нормализовать значения температур
5. Поделить данные на образцы для нейронной сети

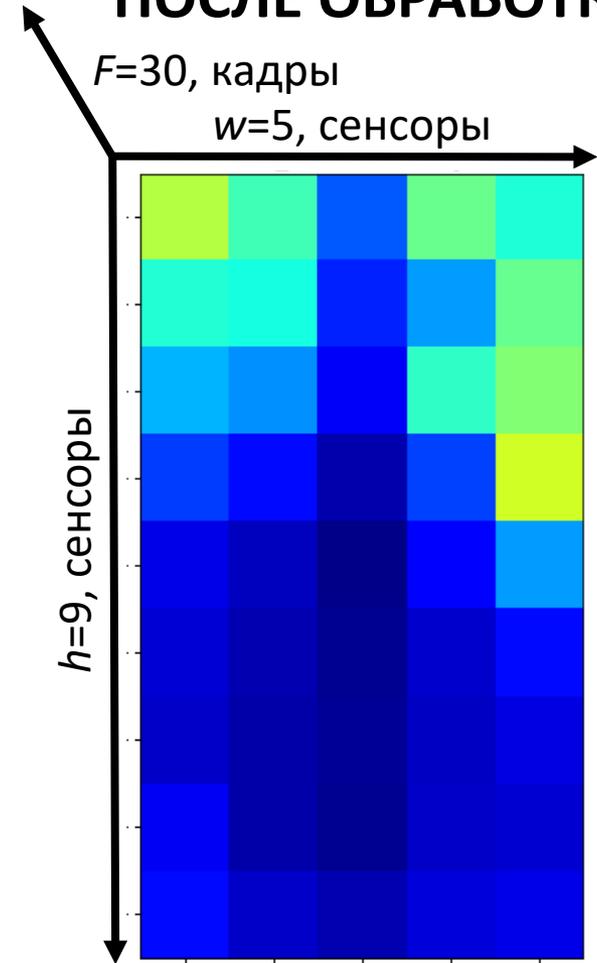


Размеры образца

ДО ОБРАБОТКИ

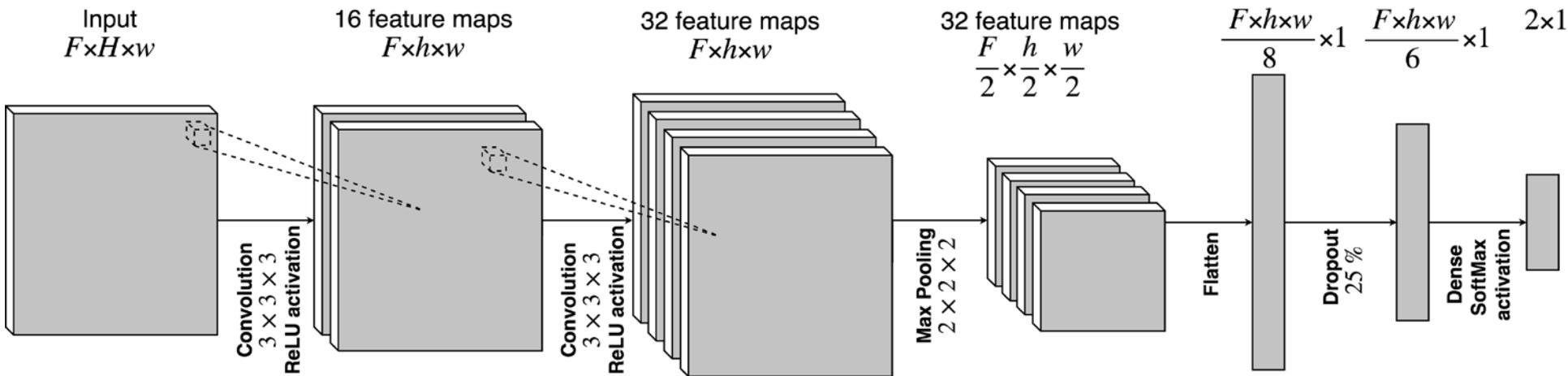


ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ



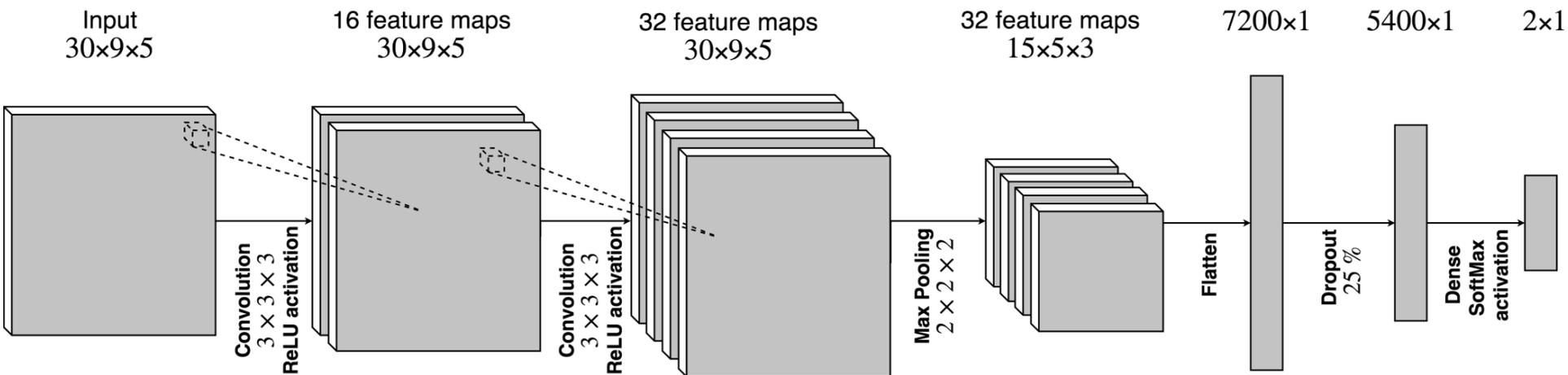
$F=30$ – количество «кадров», время между «кадрами» - 0.25с

Структура нейронной сети



- Вход – предобработанные данные за 7.5 секунд литья
- Выход – вероятности событий «налипание» и «не налипание»

Структура нейронной сети

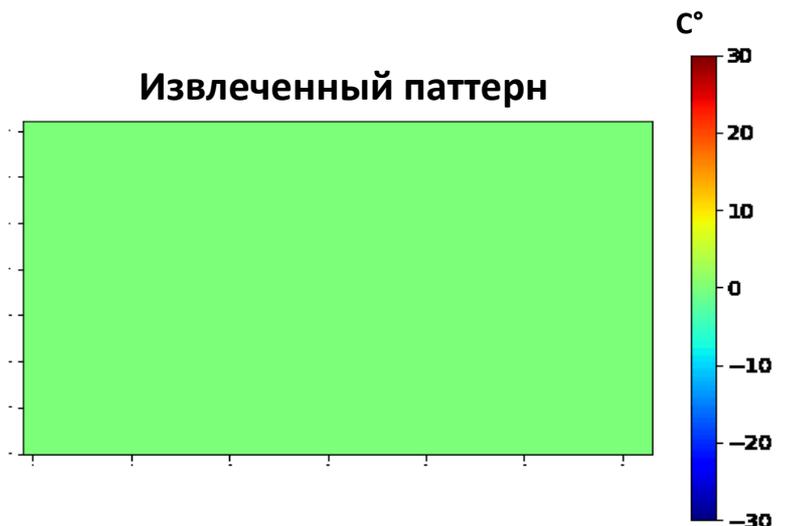
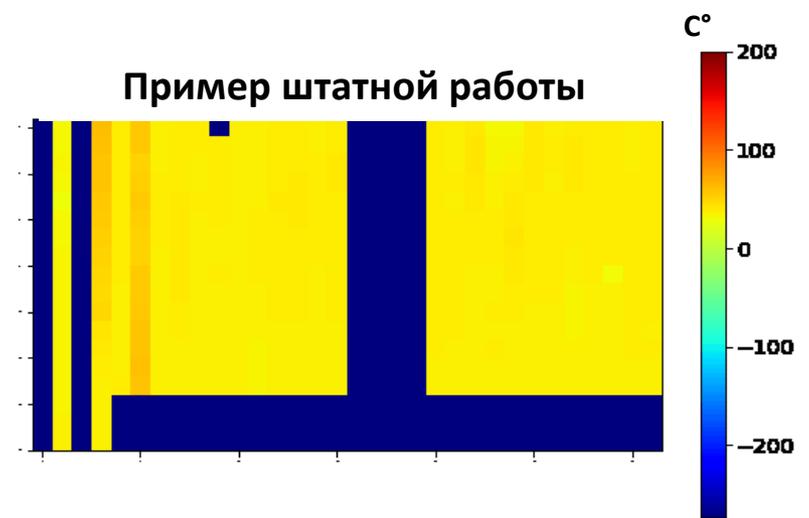
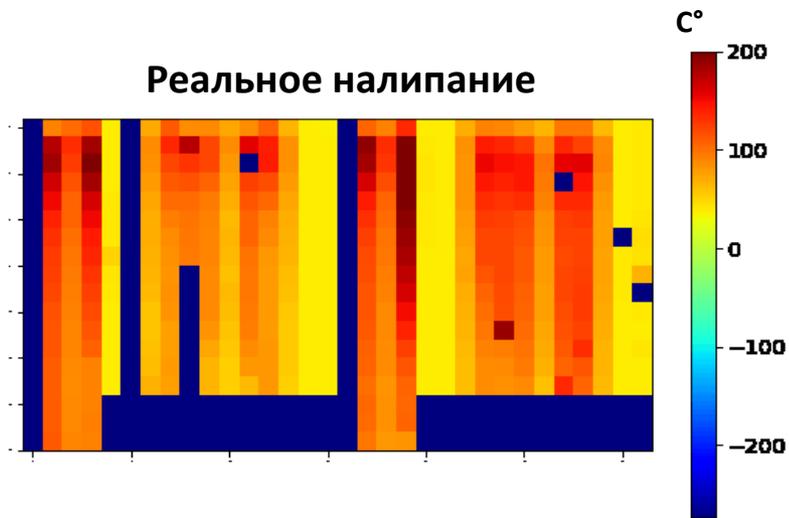


- Вход – предобработанные данные за 7.5 секунд литья
- Выход – вероятности событий «налипание» и «не налипание»

Обучающая выборка (архив SMS group)

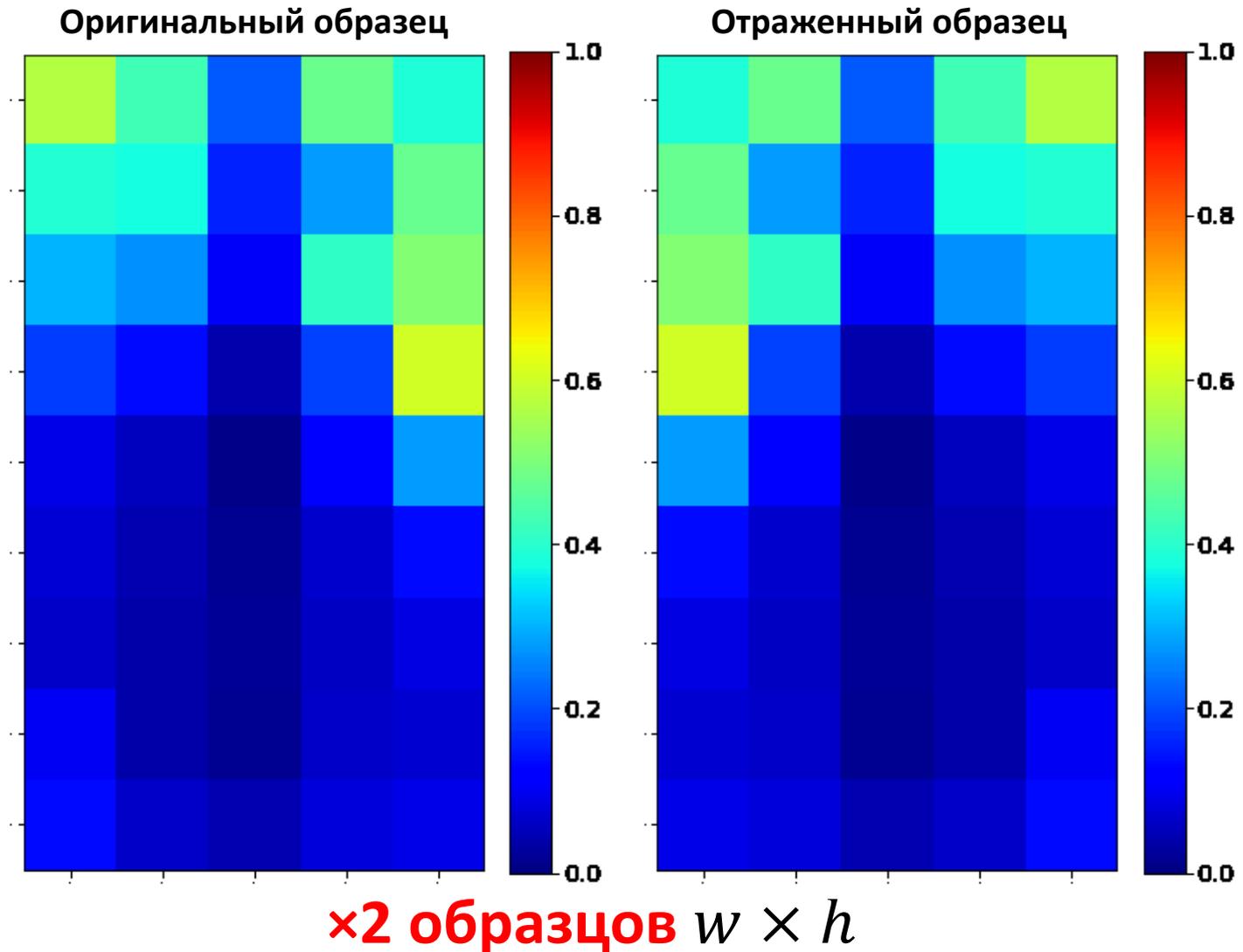
- **14** случаев налипания
- **103** ложных срабатывания
- **∞** примеров штатной работы

Аугментация: перенос паттерна



+ 6 307 примеров $W \times H$

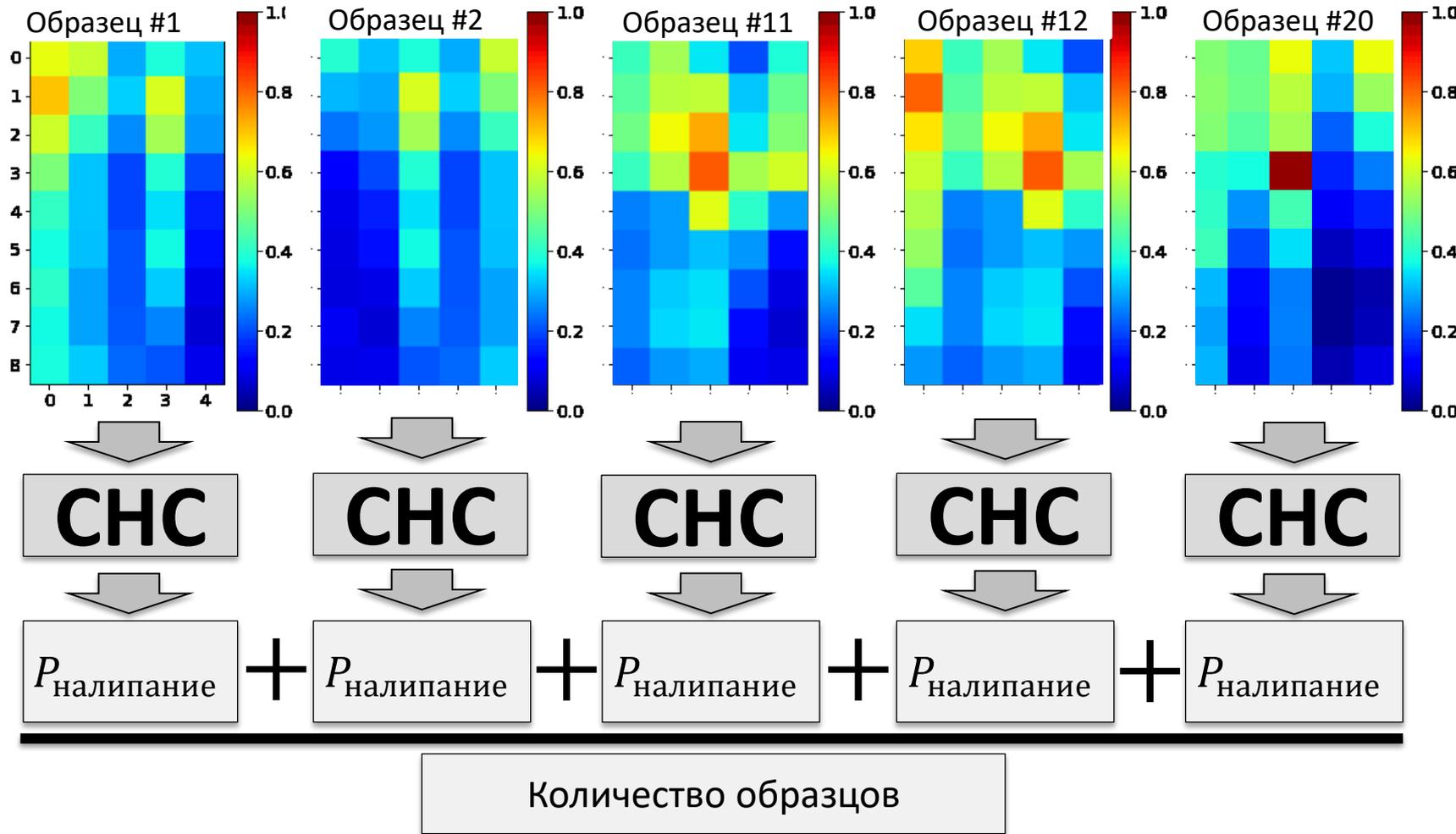
Аугментация: отражение образца



Расширенная выборка для обучения нейронной сети

| Случай | Примеры | | Образцы для СНС | Метка при обучении |
|----------------------------|----------|---------------|-----------------|--------------------|
| | Реальные | Сгенерировано | | |
| Налипание | 11 | 6 307 | ~25 000 | Налипание |
| Ложное срабатывание | 88 | 2 384 | ~7 000 | Не налипание |
| Штатная работа | 11 701 | 0 | ~30 000 | Не налипание |

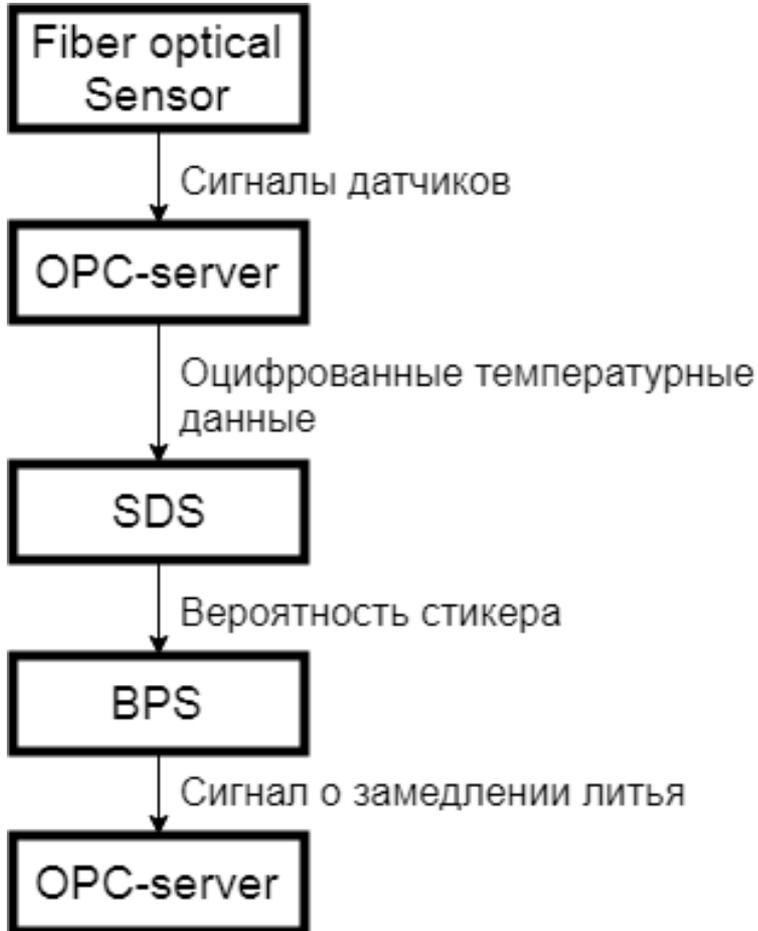
Постобработка



Если α больше порогового значения, то обнаружено налипание

Способы использования

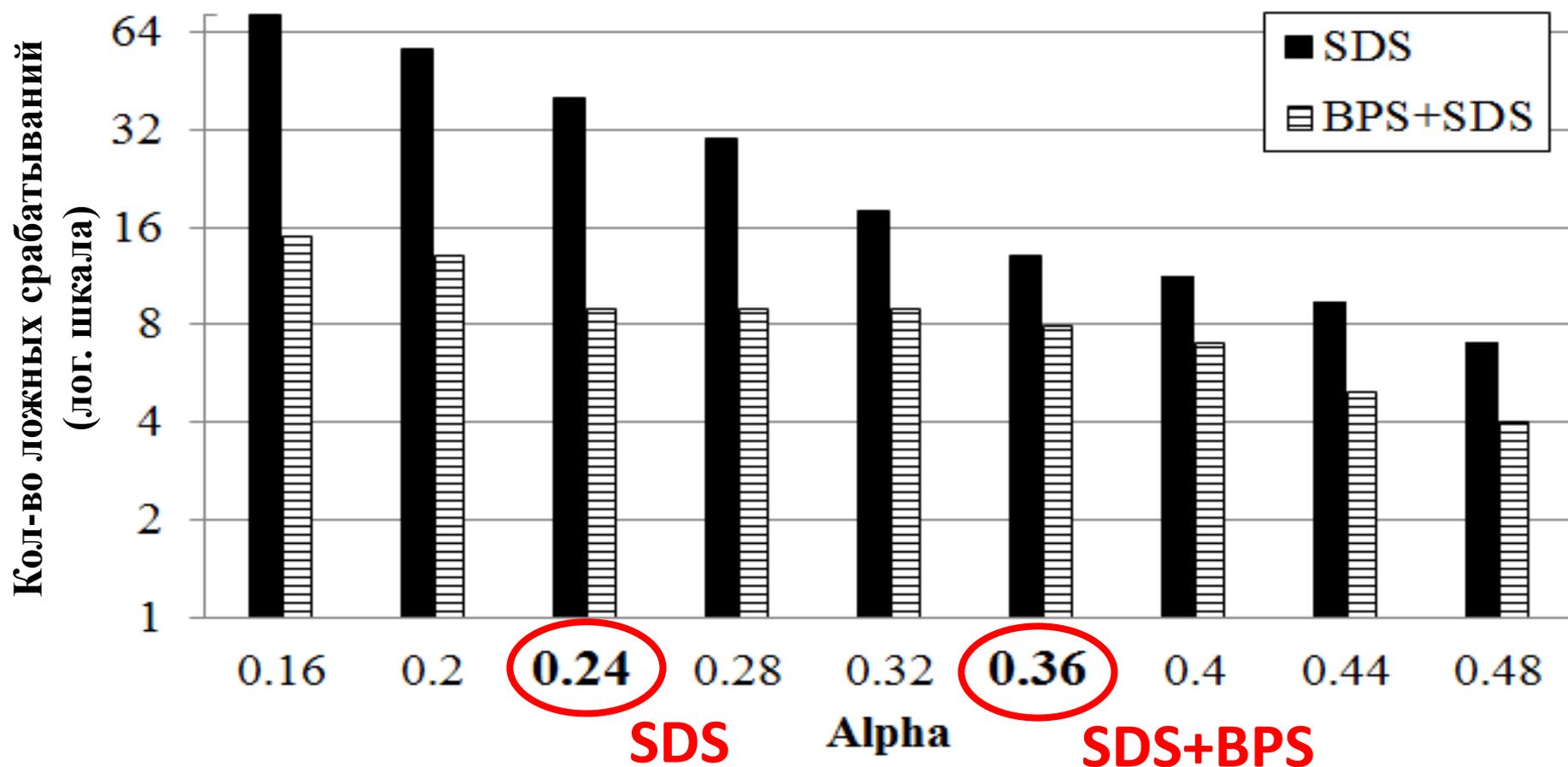
SDS



BPS+SDS



Эксперименты



Требования к оптимальному значению α :

- Все налипания обнаружены
- Наименьшее количество ложных срабатываний

Тесты

Методы работы:

- SDS
- BPS
- BPS+SDS

Тестовая выборка:

- 3 реальных налипания
- 15 ложных срабатываний
- 9 567 примеров обычной работы

| Характеристика | SDS | BPS | BPS+SDS |
|------------------------------------|-----|-----|---------|
| Налипаний обнаружено | 3 | 3 | 3 |
| Налипаний пропущено | 0 | 0 | 0 |
| Спровоцировано ложных срабатываний | 43 | 15 | 8 |

Языки программирования

MATLAB + Neural Network Toolbox

- Удобная интеграция с существующей системой
- На 40% выше скорость обучения нейронной сети

Python + Keras, TensorFlow

- Быстрое прототипирование
- Оценка возможности интеграции с существующей системой
- Использование удаленных ресурсов (Google Colaboratory)

Оборудование

Разработка на Python

- Видеокарта Tesla K80 11Gb
- Время обучения нейронной сети – 15 мин.

Разработка на MATLAB

- Процессор Intel Core i5-7200U 2.5 GHz
- Время обучения нейронной сети – более 50 час.
- Среднее время обработки одного случая обученной сетью – 150 мс

Аналоги

| Статья | Краткое содержание |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Y. Liu et al. “Visual detection based on computer vision for sticker breakout in slab continuous casting”, <i>Ironmaking and Steelmaking</i> , vol. 42, 2015. (Q2) | Проанализированы данные о 64 налипаниях, полученные с помощью термопар. Выделены характерные признаки для визуального определения налипаний. Алгоритм распознавания налипаний основе выделенных признаков не представлен. |
| B. Zhang et al. “Breakout prediction for continuous casting using genetic algorithm-based back propagation neural network model”, <i>Int. J. Model. Identif. Control</i> , vol. 16, no. 3, 2012. (Q2) | Рассмотрены методы распознавания прорыва с использованием нейронной сети на основе генетического алгоритма. Экспериментальные результаты не представлены ввиду малой мощности обучающей выборки. |
| S. Bouhouche et al. “Inferential sensor-based adaptive principal components analysis of mould bath level for breakout defect detection and evaluation in continuous casting”, <i>Appl. Soft Comput. J.</i> , vol. 34, 2015. (Q1) | Исследованы 4 метода определения прорыва с помощью отслеживания уровня стали в кристаллизаторе (в том числе нейронные сети). Прогноз и предотвращение прорывов не исследованы. |

Результаты

- Спроектировано и реализовано новое решение для обнаружения налипаний на основе сверточных нейронных сетей, внедренное в компании SMS group
- Совместное использование старого и нового решения позволяет уменьшить количество ложных срабатываний системы предупреждения прорывов жидкой стали в среднем в 2 раза с сохранением качества распознавания реальных налипаний и дает экономический эффект от €50 000 в год
- Дальнейшие исследования
 - улучшение качества распознавания
 - модификация алгоритма для работы с термopарамии
 - определение других дефектов во время непрерывного литья