

**Т.В. ПОЛИЩУК**, зам. генерального директора,  
ОАО „Азовобщешаш”, г. Мариуполь

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ, НАГРУЖЕНИЯ И КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЗМА НАКЛОНА ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ**

Запропонована методика розрахунково-експериментальних досліджень кінематики, розподілу навантажень та контактної взаємодії елементів механізму нахилу плавильної печі. Наведені результати розрахунків та експериментальних вимірювань.

The method of computational and experimental researches of kinematics, distributing of loadings and contact co-operation of elements of smelter's tilting gear is offered. The results of calculations and experimental measurings are presented.

**Введение.** При проектировании механизма наклона плавильной печи (МНПП) [1-7] возникает актуальная и важная задача разработки методики его исследования с целью обоснования конструктивных схем и параметров. Основными составляющими этой задачи являются:

1. Разработка адекватных моделей для анализа рабочего процесса наклона плавильной печи при сливе шлака и металла.
2. Вычисление воздействий в сопряжениях элементов МПНН.
3. Создание методов и моделей для анализа контактного взаимодействия при перекачивании коромысла печи на основании.
4. Разработка программно-модельного комплекса, реализующего математические и численные модели в виде специализированного программного обеспечения для многовариантных исследований процессов, протекающих при эксплуатации МНПП.
5. Обоснование параметров численных моделей МНПП по результатам экспериментальных исследований.
6. Численное исследование влияния условий эксплуатации, свойств материала и точности изготовления на кинематические, прочностные и жесткостные характеристики элементов механизма наклона плавильной печи.
7. Разработка рекомендаций по выбору конструктивных схем и параметров на примере проектирования МНПП для оснащения конкретной электроплавильной печи.

В работе описаны результаты решения описанного комплекса задач и исследований, являющихся составной частью работ по проектированию и изготовлению электроплавильной печи для уникального производства литья в ОАО „Азовмаш”.

**Выбор методов исследования.** Естественно, выбор методов исследования при решении широкого спектра задач, возникающего при разработке

такого ответственного объекта как механизм наклона плавильной печи, сам по себе является достаточно сложной задачей. При этом необходимо учитывать основные требования к проектируемому механизму:

- точность выполнения требуемых движений в процессе эксплуатации;
- высокую нагрузочную способность, позволяющую выдерживать вес конструктивных элементов, размещенных на МНПП;
- слабую чувствительность механизма к погрешностям изготовления элементов МНПП;
- относительную простоту конструкции и технологичность изготовления.

Кроме того, необходимо также ориентироваться на создание в конечном счете достаточно точного, адекватного и эффективного инструмента моделирования рабочих процессов в МНПП. А это приводит к удовлетворению следующих требований:

- I. создаваемые модели должны иметь единую методическую базу, позволяющую объединять их в единый комплекс моделей;
- II. создаваемый программно-модельный комплекс должен иметь связь с современными системами автоматизированного проектирования, что дает возможность встраивания в процесс проектирования;
- III. адекватность моделей и высокая точность результатов проводимых исследований.

В связи с описанными требованиями предлагается разработать все модели элементов и процессов в МНПП на основе единого обобщенного параметрического описания [8, 9] геометрической, кинематической, силовой, прочностной моделей и их численных реализаций. Это обеспечивает возможность сопряжения этих моделей между собой, их программных реализаций – друг с другом, а также с универсальными CAD/CAM/CAE-системами (см. требования I, II). Требование III вынуждает обратиться к расчетно-экспериментальному методу обоснования параметров численных моделей элементов сложных механических систем [8], который является достаточно эффективным инструментом обеспечения достоверности моделей и точности получаемых результатов.

Собственно, для моделирования физико-механических процессов в механизме наклона плавильной печи предлагается привлекать в зависимости от типа решаемой задачи следующие методы:

- кинематический анализ МНПП предлагается осуществлять методом кинематических диаграмм [10];
- силовой расчет механизма проводится на основе решения систем уравнений статического равновесия [11];
- геометрическое моделирование осуществляется методом создания параметрической сборки твердотельных элементов [12];
- движение механизма наклона плавильной печи записывается в виде системы дифференциальных уравнений динамики системы твердых тел [13];
- для определения контактных давлений и напряженно-

деформированного состояния (НДС) элементов конструкции МНПП привлекается метод конечных элементов [14, 15];

- макетное моделирование в сочетании с методами непосредственных измерений контактных отпечатков и электротензометрии используется для получения экспериментальных данных о поведении МНПП.

Численные модели создаются в специализированных модулях, созданных в среде Maple, Delphi, а также в универсальных пакетах инженерного анализа ANSYS, CosmosMotion, SolidWorks, ADAMS. Экспериментальные данные концентрируются в Excel-таблицах, куда также записываются отдельные наборы численных данных, а затем они сравниваются между собой.

**Исследование кинематики механизма.** Для исследования кинематики МНПП создаются несколько моделей:

- аналитическая модель, построенная методом кинематических диаграмм, создана в среде Maple [1, 2];
- кинематическая модель в среде CosmosMotion (рис. 1);
- кинематическая модель в среде ADAMS (рис. 2).

В созданных моделях реализуется шарнирное закрепление цилиндра к опорной поверхности и к самой раме МНПП (см. рис. 1). Задается условие перекачивания или контактного сопряжения цилиндрической опорной поверхности (ЦОП) с основанием. Изменяемым является расстояние между шарнирами гидроцилиндра. Отслеживается при этом характер движения каждой точки конструкции, а также угол наклона платформы к горизонту  $\alpha$  (см. рис. 1). В частности, на рис. 3 приведены зависимости угла наклона  $\alpha(u)$ , где  $u$  – удлинение цилиндра. Видно, что зависимости носят непрерывный плавный монотонный характер. Знание этих зависимостей позволяет в любом текущем положении определять взаимное положение гидроцилиндра, МНПП и точек контакта ЦОП с опорной поверхностью. Кроме того, траектории движения отдельных точек используются в дальнейшем для сравнения с экспериментальными данными.

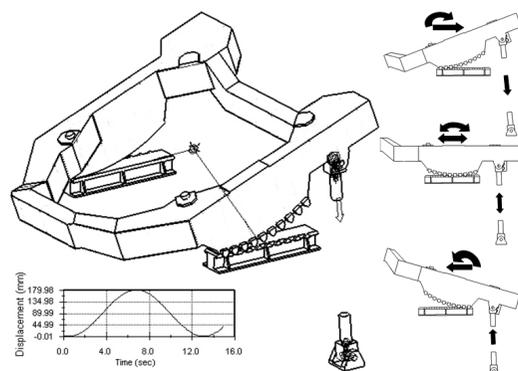


Рис. 1. Модель для исследования кинематики в среде CosmosMotion

**Силовой расчет механизма.** С использованием данных кинематического анализа с помощью специально разработанных в среде Maple, CosmosMotion, ADAMS моделей определяются усилия в сопряжении гидроцилиндра с рамой МНПП и в зонах контакта левой и правой ЦОП с основанием как функции времени, удлинения гидроцилиндра или угла наклона МНПП. На рис. 4 представлены некоторые результаты расчетов.

Из представленных данных видно хорошее соответствие результатов, полученных с использованием различных моделей. При этом усилие в сопряжении правой ЦОП с основанием практически постоянно, а в сопряжении левой ЦОП – существенно изменяется. Кроме того, важной особенностью распределения усилий является изменение знака усилия в гидроцилиндре, т.е. с тянущего оно становится толкающим в некоторой промежуточной точке движения. Еще одной обнаруженной особенностью является достаточно высокое (около 0,3) отношение горизонтального усилия к вертикальному в левой опоре, достигающееся при больших углах наклона печи в одном из граничных положений механизма. При недостаточном коэффициенте трения между ЦОП и основанием в районе этого положения возможно проскальзывание.

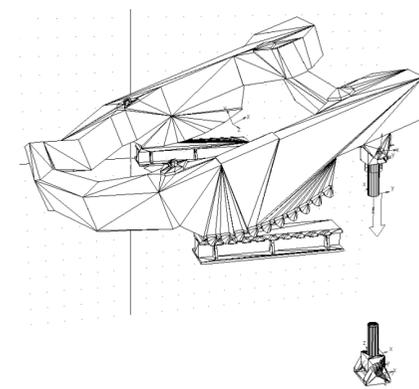


Рис. 2. Модель для исследования кинематики в среде ADAMS

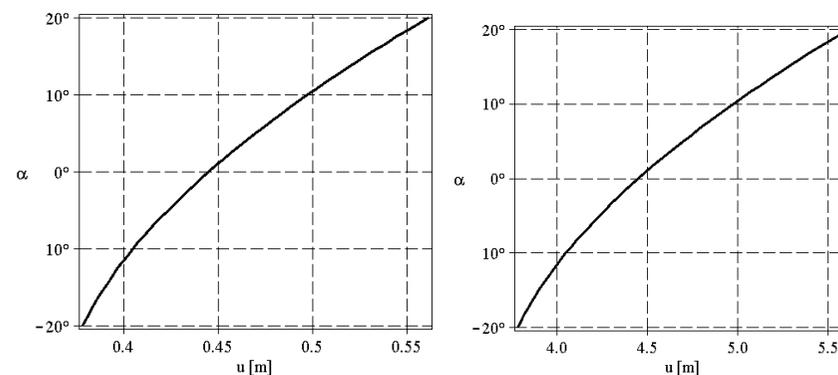


Рис. 3. Зависимости угла наклона МНПП от величины хода поршня приводного гидроцилиндра

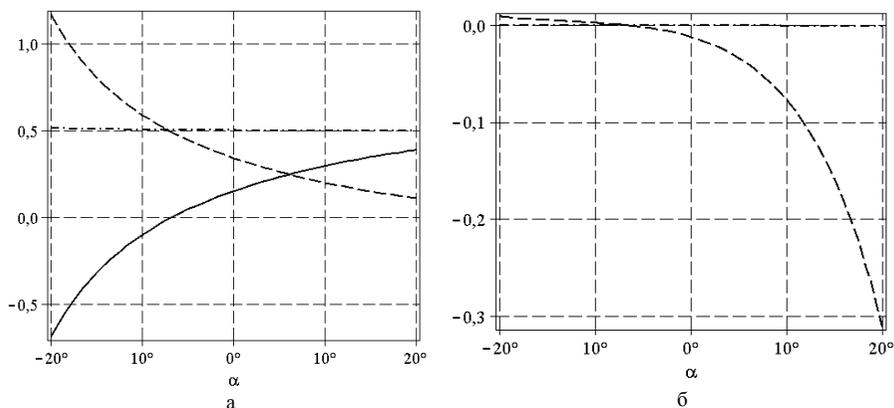


Рис. 4. Результаты силового расчета механизма наклона плавильной печи:  
 а – действующие в механизме усилия, отнесенные к весу наклонной платформы (продольное усилие в гидроцилиндре (—) и вертикальные компоненты усилий в сопряжении левого, расположенного со стороны гидроцилиндра, коромысла (---) и правого (- · -) с опорными балками);  
 б – значения отношения касательных компонент усилий к вертикальным в сопряжении левого (—) и правого (- · -) коромысел с основанием

**Геометрическое моделирование МНПП.** Являясь, по сути, первым этапом моделирования, создание геометрической модели преследует цель интеграции геометрической информации, данных о свойствах материала, о массово-инерционных характеристиках, о характере сопряжения элементов механизма, а также об усилиях в различные программные модули и системы. В связи с этим геометрическая модель (рис. 5) строится таким образом, чтобы запараметризовать как можно большее количество данных, причем так, чтобы избегать конфликтных ситуаций при варьировании тех или иных параметров (т.е. модель должна сохранить целостность, связность, полноту однозначность).

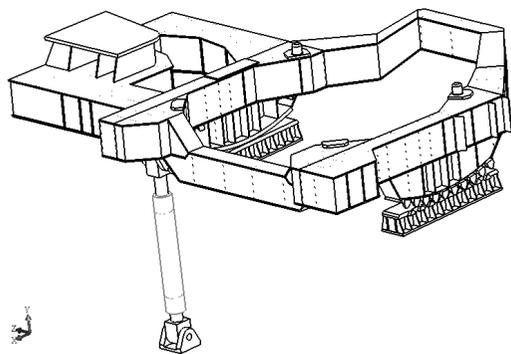


Рис. 5. Геометрическая модель механизма наклона плавильной печи

Представленная на рис. 5 модель, выполненная средствами CAD-системы SolidWorks, отвечает предъявляемым требованиям.

**Моделирование движения механизма.** При задании определяющей обобщенной координаты (например,

ход штока поршня гидроцилиндра) как функции времени одновременно можно путем интегрирования системы алгебро-дифференциальных уравнений получать закон изменения всех величин как функции времени (рис. 6). Поскольку при проведении данных исследований инерционные силы гораздо меньше весовых нагрузок, то полученные картины распределений контролируемых величин по характеру напоминают зависимости, полученные в ходе кинематического и силового анализа (см. рис. 3, 4). Отличие силовых факторов объясняется тем, что в данном случае кроме веса собственно МНПП дополнительно учтен вес остальной части печи.

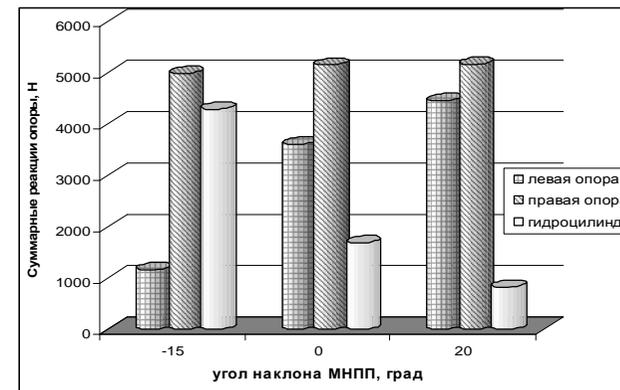


Рис. 6. Изменение кинематических и силовых характеристик, полученные при динамическом анализе МНПП с учетом веса элементов печи, расположенных на раме

**Исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкции МНПП с учетом контактного взаимодействия с опорными поверхностями.** Величина и характер распределения напряжений в металлоконструкции МНПП являются одним из наиболее важных критериев и ограничительных факторов при проектировании механизма. В связи с этим исследование НДС металлоконструкции необходимо организовывать таким образом, чтобы учесть все виды нагружения, все варианты конструктивного исполнения, а также возможные погрешности ее изготовления. Кроме того, важнейшей особенностью нагружения металлоконструкции механизма наклона плавильной печи является контактное взаимодействие цилиндрических опорных поверхностей с основанием. Поскольку в данном случае имеет место контактная задача для сложной конструкции, то прямое применение упрощенных соотношений для вычисления контактных площадок и контактных давлений неприменимо. Исходя из этого, создаваемая численная модель должна объединять в дополнение к возможности многовариантных исследований НДС МНПП также учет контактного взаимодействия.

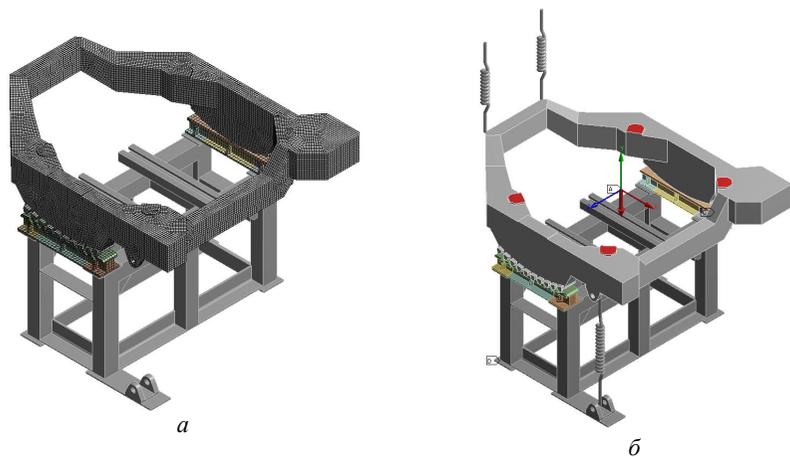


Рис. 7. Конечно-элементная

модель механизма наклона плавильной печи: (а) конечноэлементная сетка, (б) схема приложения усилий и способ закрепления элементов конструкции в модели

На рис. 7 представлена конечно-элементная модель (КЭМ) одного из вариантов МНПП, построенная в среде ANSYS. В зоне сопряжения с основанием заданы условия одностороннего контакта. С использованием этой модели проведено исследование влияния установки боковых вертикальных листов на НДС металлоконструкции МНПП, в т.ч. на характер контактного взаимодействия с основанием. На рис. 8 приведены некоторые результаты исследований. Видно, что при установке боковых вертикальных листов несколько меняется характер контактного взаимодействия в сопряжении ЦОП с основанием. Максимум контактных давлений смещается к внутренней кромке ЦОП, а вместо вытянутого овала область контакта на каждом ЦОП превращается в полуовал. Контактные давления при этом увеличиваются (до 20-30%), однако уровень напряжений в самой металлоконструкции уменьшается. Поскольку это является существенным фактором, то предлагается изготавливать опорные конструкции МНПП с установкой 3-х рядов продольных боковых вертикальных листов.

Поскольку (как выяснилось в процессе исследований) на характер распределения контактных давлений существенное влияние оказывает конструкция опорных поверхностей и прилегающие конструкции, то также была поставлена задача о влиянии погрешности изготовления МНПП (а именно опорных поверхностей) на их контактное взаимодействие с основанием, а также на напряженно-деформированное состояние металлоконструкции МНПП. На рис. 9 представлены варианты погрешности изготовления металлоконструкции, приводящие к изменению взаимного номинального положения ЦОП и основания.

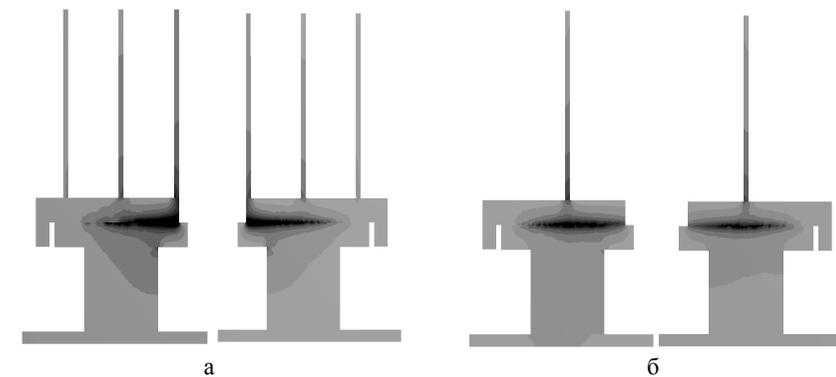
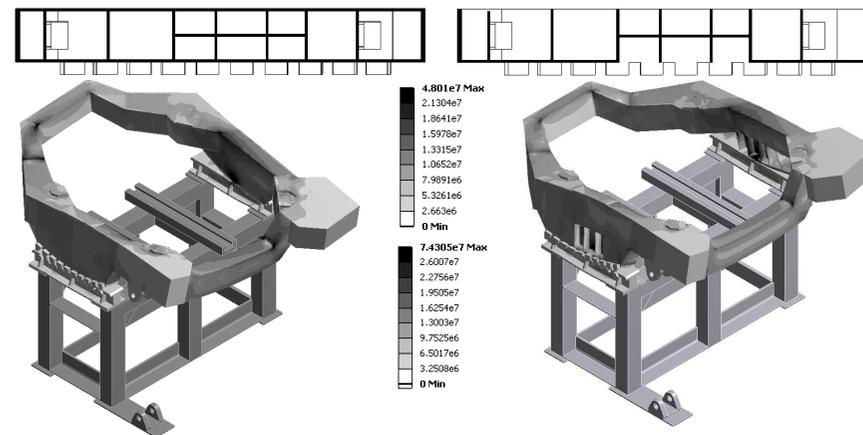


Рис. 8. Картины напряженно-деформированного состояния металлоконструкции МНПП при наличии (а) и в случае отсутствия (б) боковых вертикальных листов усиления

В табл. 1 представлены результаты расчетов. Видно, что картина напряженно-деформированного состояния меняется в зависимости от погрешности изготовления ЦОП и опорной поверхности.

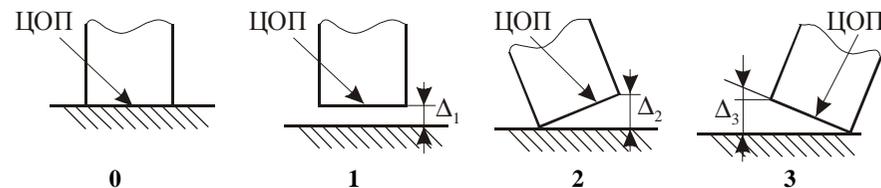


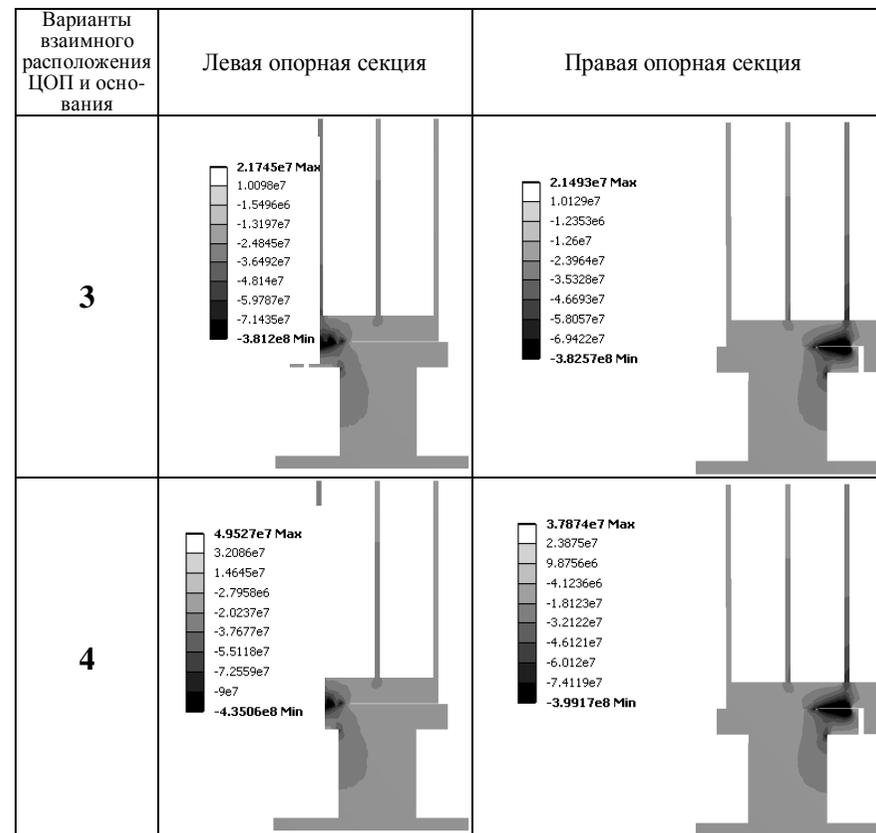
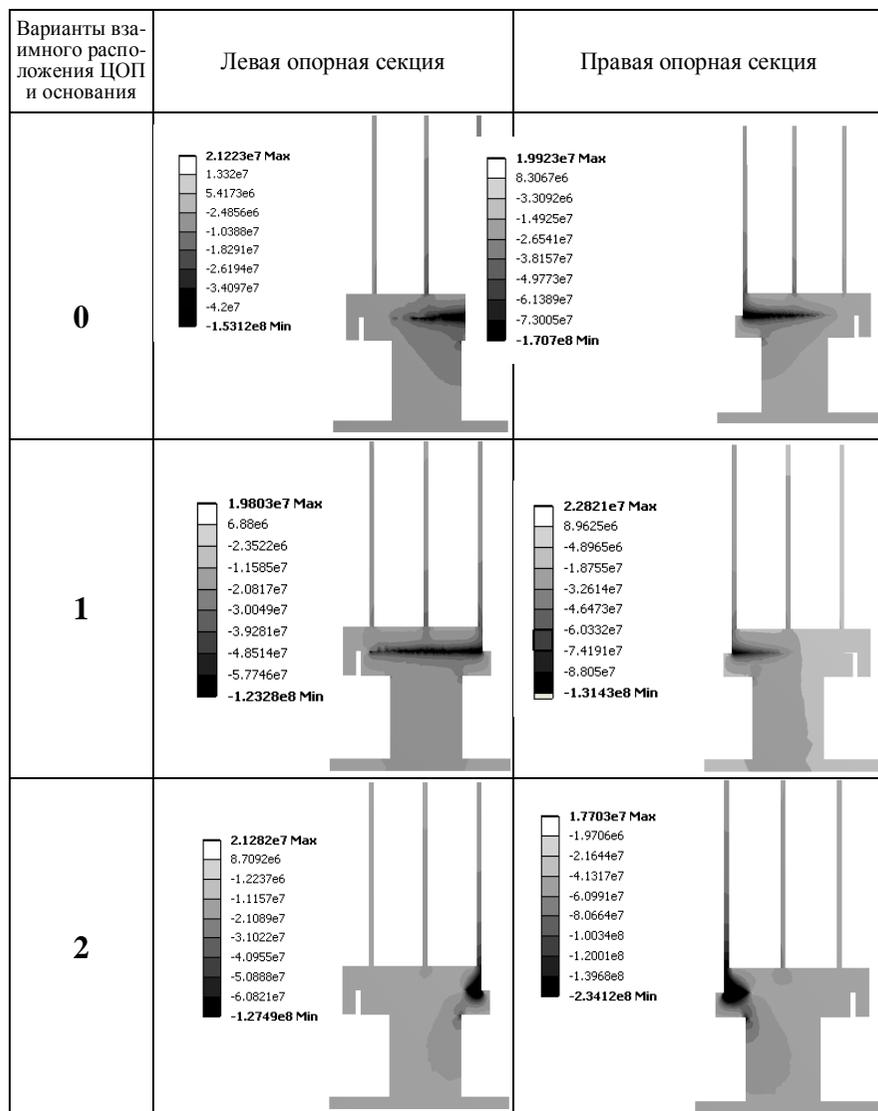
Рис. 9. Варианты взаимного расположения ЦОП и основания (1 – первоначальный равномерный зазор в правом коромысле; 2, 3 – наклон на, соответ-

ственно, наружную и внутреннюю стороны в обоих коромыслах; 0 – отвечает номинальной конфигурации без погрешности изготовления)

Продолжение табл. 1

Таблица 1

Распределение нормальных напряжений в направлении вертикальной оси в сечении, проходящем через точки касания коромысел с основанием, при изменении взаимного расположения ЦОП и основания



**Макетное моделирование МНПП.** Все приведенные численные исследования относились не к полноразмерной модели МНПП, а к его макету. Это обусловлено тем, что на этапе проектирования в рамках исследователя, как правило, могут быть только конструкции-аналоги, а при их отсутствии – физические макеты. В данном случае был изготовлен макет механизма наклона плавильной печи (рис. 10), с помощью которого был проведен цикл экспериментальных исследований.

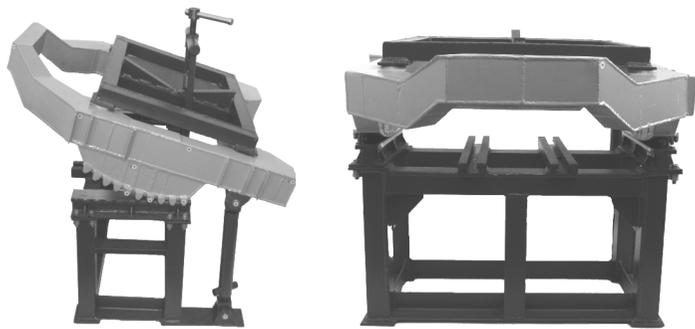


Рис. 10. Макет механизма наклона плавильной печи

На первом этапе проводились экспериментальные исследования кинематики механизма. На рис. 11 представлена схема непосредственных измерений положений точек макета в процессе движения МНПП, а также физическая модель с точками контроля. В точках контроля устанавливались лазеры, а их след фиксировался на экране (см. рис. 11) с некоторым шагом.

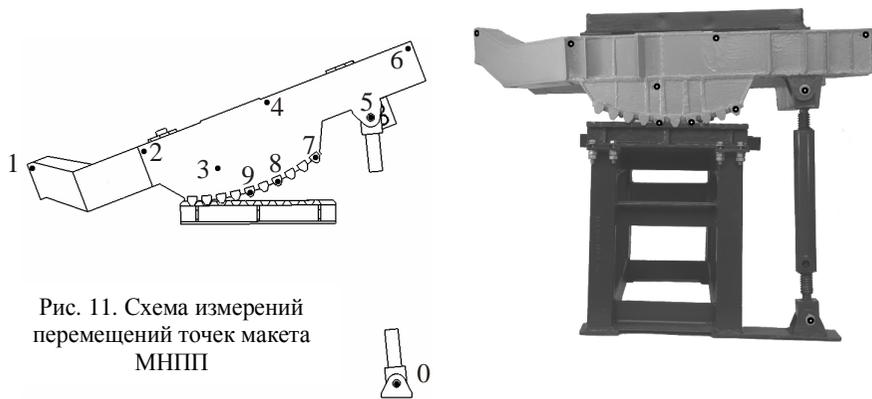


Рис. 11. Схема измерений перемещений точек макета МНПП

Кроме того, проводилась серия снимков макета МНПП при изменении длины винтового механизма, моделирующего силовой гидроцилиндр. Дополнительно с большой выдержкой фиксировалась траектория движения лазерных следов от контрольных точек на экране. Полученные положения, траектории контрольных точек представлены на рис. 12 (там же – результаты численных расчетов). Как видно, получено полное качественное совпадение численных и экспериментальных результатов, а также удовлетворительное количественное (погрешность – 9 %). Это свидетельствует, во-первых, об адекватности созданных численных моделей МНПП для кинематического анализа и точности результатов, получаемых с помощью этих

моделей. Этот факт обосновывает возможность применения разработанной модели для исследования кинематики реальной конструкции механизма наклона плавильной печи. Кроме того, поскольку данные кинематического анализа являются исходными данными для проведения остальных видов анализа, то можно констатировать, что базовые исходные данные для цепочки расчетов определяются достаточно точно, т.о. исключается потеря времени вследствие допущения погрешности на первом их этапе.

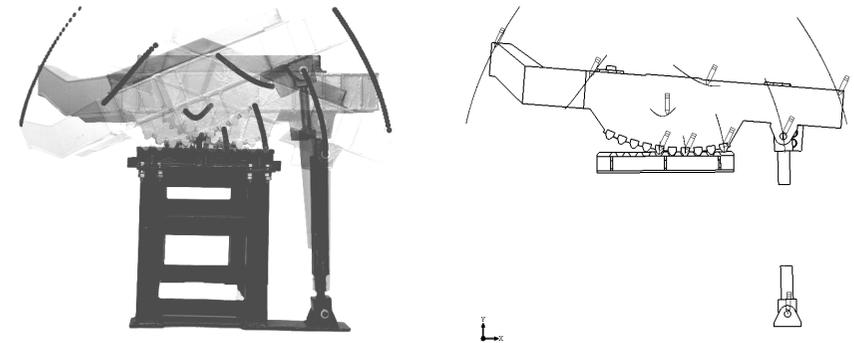


Рис. 12. Результаты экспериментального измерения и численного расчета положения контрольных точек макета МНПП

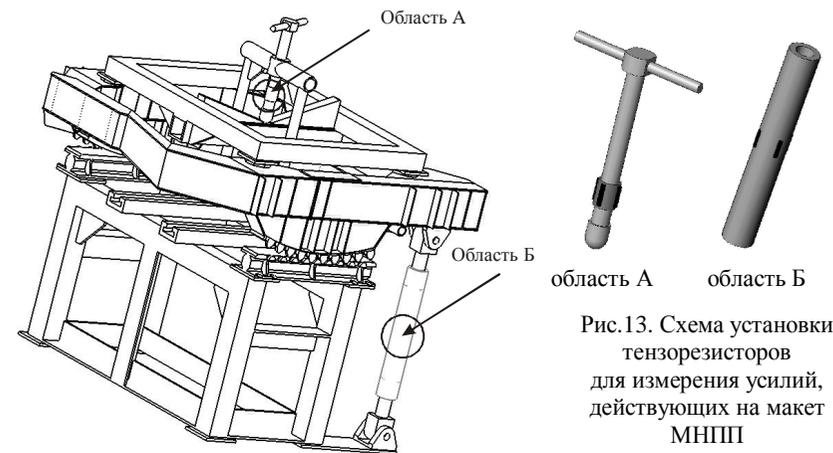


Рис. 13. Схема установки тензорезисторов для измерения усилий, действующих на макет МНПП

На втором этапе экспериментальных исследований измерялись усилия в элементах макета механизма. На рис. 13 представлена схема установки тензорезисторов на макет гидроцилиндра и на шток имитатора весовой нагрузки. Тензорезисторы подсоединяются к измерителю статических деформаций ИСД-3 и при приложении нагрузки фиксируют деформацию тех элементов, на которые они наклеены. Предварительная тари-

ровка дает возможность по показаниям ИСД-3 вычислить усилия на штоке и на гидроцилиндре. В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований. Анализ этих данных показывает, что численные и экспериментальные результаты согласуются достаточно хорошо (погрешность – в пределах 7%). Это позволяет использовать кинестатические и динамические численные модели для анализа силовых потоков в механизме наклона плавильной печи в разных положениях, а также передавать эти достоверные данные для дальнейшего исследования напряженно-деформированного состояния и контактного взаимодействия.

На третьем этапе проводилось контрольное измерение напряжений в области, примыкающей к зоне контакта ЦОП с основанием. На рис. 14 показана схема наклейки тензорезисторов на металлоконструкцию МНПП. Поскольку заранее при проведении численных исследований зоны с высокими уровнями напряжений уже были выявлены, то можно было ограничиться установкой небольшого количества тензодатчиков именно в наиболее нагруженных частях металлоконструкции.

Экспериментальные данные о напряжениях сведены в табл. 3. Из анализа представленных данных следует, что области высоких уровней напряжений при проведении численных расчетов предсказаны точно, а величины напряжений в них согласуются с экспериментально полученными с погрешностью, не превышающей 8%. Это, в свою очередь, позволяет использовать конечно-элементные модели МНПП для проведения многовариантных исследований его напряженно-деформированного состояния с гарантией высокой точности получаемых результатов.

На четвертом этапе экспериментальных исследований рассматривался очень важный фактор – характер распределения контактных зон и контактных давлений в сопряжении ЦОП МНПП с основанием. Одним из наиболее современных и высокоэффективных методов фиксации контакт-

ных давлений является использование контактных пленок Fujitsu. Они дают высокую точность измерений в широком диапазоне давлений (от 0,5 МПа до 100 МПа), в связи с чем были применены для фиксации давлений в сопряжении ЦОП с основанием (рис. 15). На рис. 16 приведены примеры контактных отпечатков, полученных при различных вариантах нагружения макета МНПП.

Таблица 2  
Результаты измерений усилий на штоке и гидроцилиндре макета МНПП

№ экс.	Положение макета	т. А, Н	т. Б, Н
1	горизонт	6976.4 ± 12	1437.4 ± 12
2	- 15 град	4968.4 ± 12	0 ± 12
3	+ 20 град.	4968.4 ± 12	-47.6 ± 12

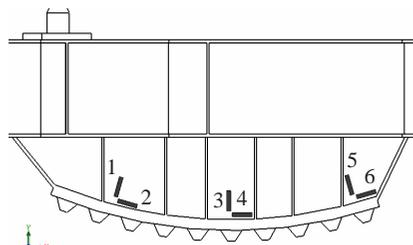


Рис 14. Схема наклейки тензорезисторов на макете МНПП

Таблица 3  
Результаты тензометрических измерений

№ тензодатчика	Положение			
	-15	0	+20	
левые	L1	2.5E-05	1.0E-05	1.9E-05
	L2	1.0E-05	-2.0E-06	0.0E+00
	L3	4.0E-06	-4.0E-05	1.4E-05
	L4	-1.3E-05	5.0E-05	7.0E-06
	L5	5.0E-06	-5.0E-06	-1.5E-05
	L6	2.0E-06	1.6E-05	8.5E-05
правые	R1	2.0E-05	3.6E-05	1.4E-05
	R2	0.0E+00	-3.0E-06	5.0E-06
	R3	3.0E-06	-1.5E-05	5.0E-06
	R4	2.0E-06	4.0E-05	9.0E-06
	R5	1.5E-05	7.0E-06	-1.0E-05
	R6	-2.0E-06	2.1E-05	3.6E-05

Уже визуальный анализ картин на рис. 16 свидетельствует о достаточно хорошем соответствии распределений, полученных экспериментально, с численно определенными ранее (см. табл. 1). Для уточнения количественного соответствия требуется дополнительный численный анализ контактных давлений с учетом упругих свойств пленки. Неполное соответствие приведенных результатов объясняется погрешностями изготовления макета, оказывающими существенное влияние на контактные давления, и дефектами микрорельефа сопряженных поверхностей, также влияющими на величины и распределения контактных давлений.

В целом же подтверждается точность численных результатов, достоверность создаваемых моделей и возможность их применения при проведении исследований контактного взаимодействия в сопряжении ЦОП с основанием механизма наклона плавильной печи.

**Заключение.** Проведенный широкий комплекс численных и экспериментальных исследований механизма наклона плавильной печи является достаточно полным с точки зрения охвата наиболее существенных факторов и процессов, оказывающих влияние на работоспособность, нагрузочную способность, прочность, точность его работы. Обоснована адекватность предложенных в статье аналитических и численных моделей для исследо-

вания кинематики, усилий, динамики, напряженно-деформированного состояния и контактного взаимодействия МНПП и оценена экспериментальным путем точность результатов. Результирующая погрешность, допускаемая при численном исследовании, не превышает 10-15 %.

Полученные результаты дают основание и возможность применять построенные модели и полученные результаты в дальнейшем при обосновании конструктивных и физических параметров при проектировании меха-

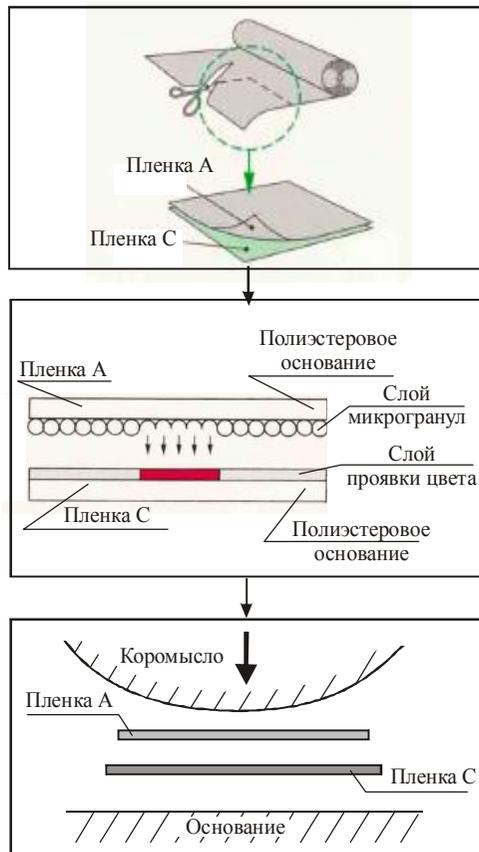


Рис. 15. Схема установки контактных пленок в сопряжении ЦОП с основанием

низма наклона плавильной печи.

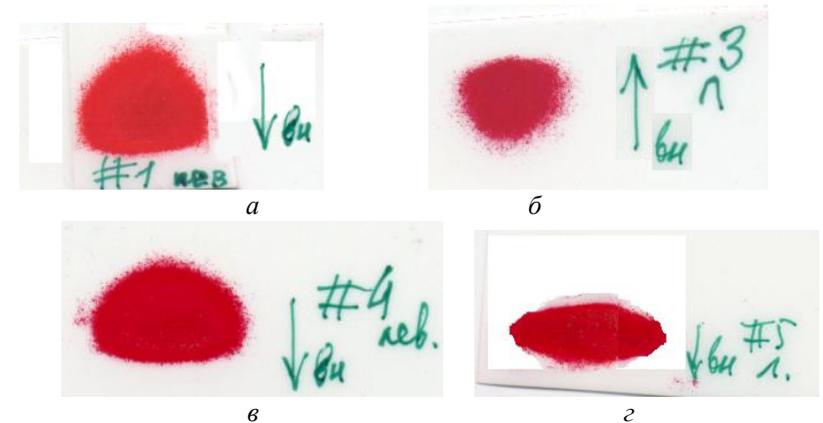


Рис. 16. Контактные отпечатки, полученные в сопряжении левого коромысла макета МНПП с основанием:  
 а, б – горизонтальное положение платформы, прижимающее усилие составляет 7000 Н и 1150 Н соответственно;  
 в – наклон платформы вперед, усилие 4970 Н;  
 г – наклон платформы назад, усилие 4970 Н

**Список литературы:** 1. *Полищук Т.В., Пеклич М.М., Ткачук Н.Н.* Кинематический и силовой расчет механизма наклона плавильной печи // *Механiка та машинобудування*. – 2007. – №1. – С.100-106. 2. *Полищук Т.В., Ткачук Н.Н.* К вопросу о кинематическом и силовом анализе механизма наклона плавильной печи // *Вiсник НТУ "ХП"*. Тем. вип.: "Машинознавство та САПР". – 2007. – №29. – С.122-131. 3. *Полищук Т.В.* Оптимальное проектирование механизма наклона плавильной печи: модели для анализа напряженно-деформированного состояния // *Вiсник НТУ "ХП"*. Тем. вип.: "Динамiка та мiцнiсть машин". – 2007. – № 38. – С.129-134. 4. *Полищук Т.В.* Модельная задача об изгибе коромысла механизма наклона плавильной печи // *Вiсник НТУ "ХП"*. Тем. вип.: "Машинознавство та САПР". – 2008. – №2. – С.125-144. 5. *Полищук Т.В.* Напряженно-деформированное состояние макета механизма наклона плавильной печи: модели, алгоритмы, результаты // *Вiсник НТУ "ХП"*. Тем. вип.: "Машинознавство та САПР". – 2008. – № 9. – С.103-114. 6. *Полищук Т.В.* К обоснованию выбора параметров конечно-элементной модели макета механизма наклона плавильной печи // *Восточно-европейский журнал передовых технологий* – 2008. – 1/1 (31). – С.46-49. 7. *Чепурной А.Д., Полищук Т.В., Ткачук Н.А.* Теоретические основы проектирования механизма наклона плавильной печи // *Восточно-европейский журнал передовых технологий* – 2008. – 1/1 (31). – С.46-49. 8. *Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А.* Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения. // *Механiка та машинобудування*. – 2005. – № 1. – С.184-194. 9. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания // *Механiка та машинобудування*. – 2006. – №1. – С.57-79. 10. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин. Учеб. для ВТУЗов. – М.: Наука, 1988. – 640 с. 11. *Лурье А.И.* Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. 12. *Куневу Ли* Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с. 13. *Дмитроченко О.Н.* Эффективные методы численного моделирования динамики нелинейных систем абсолютно твердых и деформируемых тел // *Дисс. канд. физ.-мат. наук.*, Москва, 2003. 14. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 15. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.