

S. A. Trembach
Cherepovets State University (ChSU)

SYSTEM FOR GENERATING ELECTRICAL ENERGY WITH ELECTROMAGNETIC STIMULATION OF THE MOVEMENT OF A PHYSICAL PENDULUM

This article describes a method for converting the energy of pendulum oscillations into electrical energy, and also calculates the output and consumption of the energy generation system through pendulum oscillations. System for converting energy of gravity into electrical consists of a physical pendulum, the frame on which pendulum is mounted on ball bearings, at least one driven and at least one leading gear mechanism, the generator, acceding to the pendulum via the same gear mechanism, the battery, where all the generated energy is supplied and from which energy is drawn on to maintain the system, two electromagnets that keep the pendulum oscillating undisturbed, and the two relays that optimizes the energy consumption of the electromagnets and set them mode, according to the period of complete oscillation of the pendulum. Based on the results of the calculation the production of a prototype of this electric power generator was launched. Putting this generator into operation will have a positive impact on the energy situation around the world – this electric power generator does not depend on the geographical location, as well as other factors, such as the time of day, time of year, and other problems of known renewable energy sources.

Renewable energy sources, gravity energy, physical pendulum, generation of electric energy

УДК 621.365.5

С. С. Титов
ООО «Научно-производственное предприятие „Система48“» (г. Липецк)

В. Н. Мещеряков, Д. В. Безденежных
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Исследование процесса нагрева металлических шаров в инновационной индукционной установке

Рассматривается исследование процесса нагрева металлических шаров в инновационной индукционной установке для поточного осесимметричного нагрева металлоизделий с дискретной площадью поперечного сечения, проанализировано время нагрева металлического шара до заданной температуры в зависимости от его параметров и режимов работы установки, представлены результаты моделирования процессов и проведенных экспериментальных исследований, а также их сопоставление и анализ. Следует отметить, что создание энергоэффективного оборудования непрерывного действия, обеспечивающего симметричный нагрев на заданную глубину под термообработку изделий шарообразной формы без окисления и обезуглероживания, исключительно актуально для ряда отраслей промышленности, в частности в массовых производствах мелющих тел для горно-обогатительных фабрик и цементных заводов, шариков для подшипников качения и клапанов в гидравлических системах, в том числе высокоизносостойких шариков в обратных клапанах глубинных насосов для нефтедобычи, и др. Рассматриваемая установка индукционного нагрева металлических шаров отличается высоким уровнем новизны, что подтверждено патентами РФ, а также интересом к разработке со стороны ряда промышленных предприятий в РФ (АО «Оскольский электрометаллургический комбинат», «Евроцемент групп» и др.) и за рубежом, в частности «TENOVA LOI Thermprocess GmbH» (Германия) и «Magnatech GmbH» (Австрия).

Установка индукционного нагрева, осесимметричный индукционный нагрев, металлоизделие шарообразной формы, токи высокой частоты, металлический шар, закалка

В последние несколько лет вышел ряд публикаций [1]–[3], в том числе на международном уровне (отчет о международном поиске международного поискового органа по процедуре Patent Cooperation Treaty – номер международной заявки

PCT/RU 2019/050223), затрагивающих вопросы симметричного индукционного нагрева под термообработку металлоизделий шарообразной формы на заданную глубину токами повышенной частоты. Прикладное назначение использования

проводимых разработок обусловлено подтвержденной потребностью в разрабатываемом оборудовании со стороны горно-обогатительных фабрик и цементных заводов, машиностроения, предприятий, выпускающих оборудование для нефтяной промышленности (в том числе высокоизносостойкие шарики в обратных клапанах глубинных насосов для нефтедобычи), предприятий, занимающихся высокотехнологичной термообработкой металлоизделий (способы придания заданных свойств сферическим поверхностям симметричным термодиффузионным легированием (хром, титан, бор и др.)), и пр.

Таким образом, видится актуальной постановка задачи об исследовании процессов, протекающих при нагреве металлических шаров, в зависимости от параметров инновационной индукционной установки и нагреваемой заготовки (металлический шар).

Исследование процесса индукционного поточного нагрева на металлических шарах различного диаметра. Процесс исследования индукционного поточного нагрева заключается в оценке времени движения и конечной температуры шаров при их проходе через всю установку, состоящую из трех секций [3], эскиз одной секции представлен на рис. 1 (а – вид спереди, б – вид сверху, в – вид слева). Для разработки математической модели установки индукционного осесимметричного нагрева металлических шаров был поставлен ряд опытов по движению шаров через одну секцию без вращения и с вращением соответственно; протестирован режим статического нагрева шаров (шар покоится), а также режим охлаждения шаров при их движении.

В рамках тестирования режима статического нагрева шаров был проведен теоретический рас-

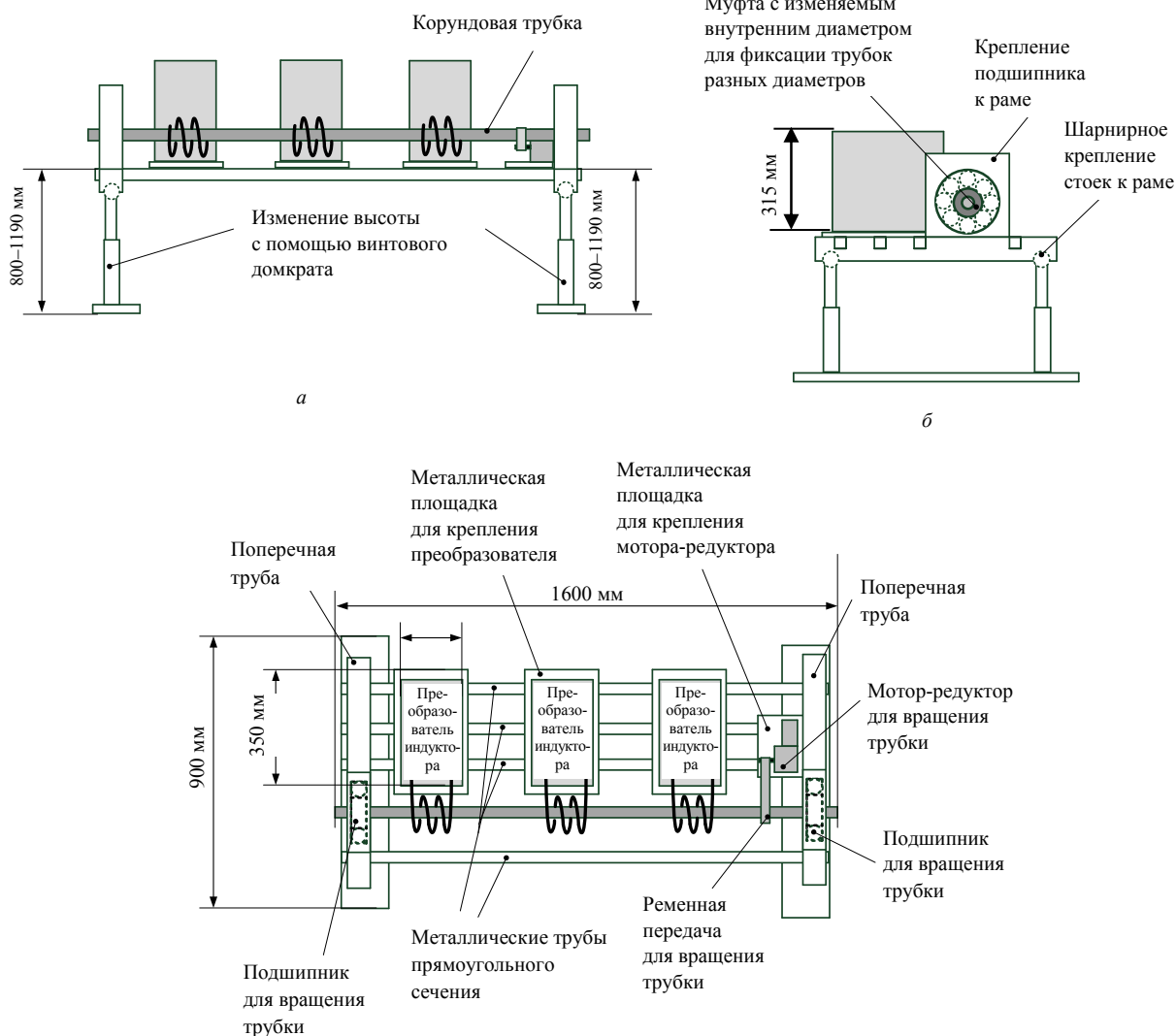


Рис. 1

чет времени нагрева неподвижного шара. Количество энергии E , которое необходимо сообщить телу для изменения температуры на ΔT , равно [4]

$$E = \rho Q V \Delta T, \quad (1)$$

где Q – удельная теплоемкость материала шара; ρ – плотность материала шара; V – объем шара.

Количество энергии E можно записать как [5]

$$E = t_{\text{н}} P_{\text{ш}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{н}}$ – время нагрева шара; $P_{\text{ш}}$ – мощность, передаваемая к шару.

Примем допущение, что температура при нагреве шара диаметром $D_{\text{ш}}$ изменяется только в верхнем слое толщиной $\Delta_{\text{н}}$ (глубина нагреваемого слоя). Подставляя (1) в (2) и выразив объем шара V через диаметр [6], получим следующую формулу для времени нагрева верхнего слоя шара толщиной $\Delta_{\text{н}}$:

$$t_{\text{н}} = \frac{\pi \rho Q \Delta T}{6 P_{\text{ш}}} \left[D_{\text{ш}}^3 - (D_{\text{ш}} - 2\Delta_{\text{н}})^3 \right]. \quad (3)$$

За счет теплообмена внутри материала шара глубина нагреваемого слоя $\Delta_{\text{н}}$ больше глубины проникновения магнитного поля в сталь [7]–[8], т. е. нагреваемая поверхность отдает тепло внутрь шара. В табл. 1 представлены результаты моделирования при предположении о разной глубине прогрева шара (в процентах от его диаметра) от максимальной 50 % (прогрев шара на всю глубину) до минимальной, равной глубине проникновения магнитного слоя в сталь.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными показывает, что прогрев шаров диаметром 12.7 мм происходит вплоть до центра, т. е. глубина прогрева равна 50 % (значения времени нагрева 6.86 и 7.88 с близки к экспериментальным). При меньших токах индуктора экспериментальное время нагрева выше, чем расчетное, даже для полного прогрева шара. Это объясняется одновременным рассеянием тепла от нагреваемого шара при длительном нагреве с небольшой мощностью.

Сравнение результатов для шаров диаметром 1...8 мм показывает, что при токах индуктора 630...680 А происходит прогрев на глубину порядка 25 %, при меньших токах увеличивается время нагрева и, следовательно, шар успевает прогреваться на максимальную глубину до центра.

Исходя из требований к установке, заключающихся в осуществлении преимущественно поверхностного нагрева, в дальнейшем будем работать на максимально возможном токе индуктора 680 А без необходимости его регулировки в большом диапазоне.

В процессе движения шаров по транспортирующим трубкам вне области индукторов, а также после выхода шаров из трубки происходит их охлаждение. Предварительный расчет охлаждения проведем, используя методику [9], где текущая температура шара T определяется как

$$T = T_{\text{ср}} - \frac{T_{\text{ср}} - T_{\text{нач}}}{e^{tm_{\text{ал}}}}, \quad (4)$$

Таблица 1

Диаметр шара $D_{\text{ш}}$, мм	Выходной ток преобразователя индуктора, А	Время нагрева до 780 °С, с					
		эксперимент	моделирование при глубине прогрева				
			Max (50 %)	25 %	10 %	5 %	Min
12.7 (индуктор с внутренним диаметром $d_{\text{и}} = 30$ мм)	290	34	24.51	21.45	11.96	6.64	4.8
	450	21	15.27	13.36	7.45	4.14	2.99
	550	12.1	10.03	8.77	4.89	2.72	1.96
	630	7.9	7.88	6.89	3.85	2.14	1.54
	680	6.9	6.86	6	3.35	1.86	1.34
19.8 (индуктор с внутренним диаметром $d_{\text{и}} = 40$ мм)	290	47	43.4	38	21.19	11.77	6.19
	450	27.2	25.68	22.47	12.53	6.96	3.66
	550	18.5	17.9	15.68	9.04	5.02	2.64
	630	12.5	14.2	12.42	7.16	3.97	2.09
	680	10.1	12.66	11.08	6.18	3.43	1.46

где $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды; $T_{\text{нач}}$ – температура шара перед началом охлаждения; $m_{a\lambda}$ – расчетный темп охлаждения; t – время от начала охлаждения.

Расчетный темп охлаждения определяется как

$$m_{a\lambda} = \frac{Bi}{\sqrt{1 + 1.44Bi + Bi^2}} \frac{4\lambda\pi^2}{\rho Q D_{\text{ш}}^2}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности (значения указаны в табл. 2); Q – удельная теплоемкость материала шара [10]; ρ – плотность материала шара; Bi – модифицированное число Био.

Модифицированное число Био для шара определяется как

$$Bi = \frac{3\alpha D_{\text{ш}}}{2\lambda\pi^2}, \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи на границе поверхность тела – среда.

Окончательно расчетный темп охлаждения равен

$$m_{a\lambda} = \frac{6\alpha}{\rho Q D_{\text{ш}} \sqrt{1 + 1.44Bi + Bi^2}}. \quad (7)$$

В (7) неизвестен коэффициент теплоотдачи α . Он зависит от скорости потока носителя тепла, вида течения, геометрии поверхности твердого тела и т. д. Это – сложная величина, и ее невозможно определить общей формулой. Обычно коэффициент теплоотдачи находят экспериментально [9]. Для его определения проведем опыты с охлаждением шаров, имеющих разные диаметры, при движении через вращающуюся трубку

(транспортирующий элемент секции установки). Данные о времени охлаждения шаров сведены в табл. 3.

Подберем коэффициент теплоотдачи, сопоставляя данные из табл. 3 с аналогичными данными, полученными при моделировании. Результаты, при которых данные, полученные при моделировании, наиболее близки к данным из табл. 3, дают значения коэффициента $\alpha = 500, 450, 350, 300$ для шаров с диаметрами 10, 12.7, 17, 19.8 мм соответственно. Указанные значения коэффициента в дальнейшем будут использоваться в математической модели.

Данные опыты позволили определить требуемые технологические параметры установки: углы наклона секций, скорости вращения трубок, мощность нагрева, для каждого типоразмера шара. Разработанная математическая модель основывается на модели, использованной в исследованиях [3], с учетом дополнений, внесенных по результатам опытов. Разработанная модель в ПО Simulink [1]–[13] представлена на рис. 2–5.

На главном экране модели (рис. 2) отображается мгновенный пройденный шаром путь S , мм и текущая скорость v , м/с. Задаваемыми параметрами являются углы наклона трубок к горизонту ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$), диаметр шара D , активная глубина нагрева d_n %, удельная подводимая к поверхности шара мощность P_u или общая мощность нагрева P , температура окружающей среды $T_{\text{ср}}$, коэффициент теплоотдачи α , коэффициент сопротивления качению δ , положение секций индуктора вдоль трубок. Также на экране

Таблица 2

Параметр	$T, ^\circ\text{C}$				
	20	200	400	500	700
Коэффициент теплопроводности λ ШХ15, Вт/(м·К)	40	40	37	32	32

Таблица 3

$D_{\text{ш}}, \text{мм}$	Время, с				
	$T = 700 \rightarrow 600 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T = 600 \rightarrow 500 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T = 500 \rightarrow 400 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T = 400 \rightarrow 300 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T = 300 \rightarrow 200 \text{ } ^\circ\text{C}$
10	2.5	2.7	3.1	3.9	5.4
12.7	3.5	3.9	4.45	5.5	7.75
17	6.1	6.65	7.6	9.5	13.1
19.8	8.2	9	10.3	12.9	19.4

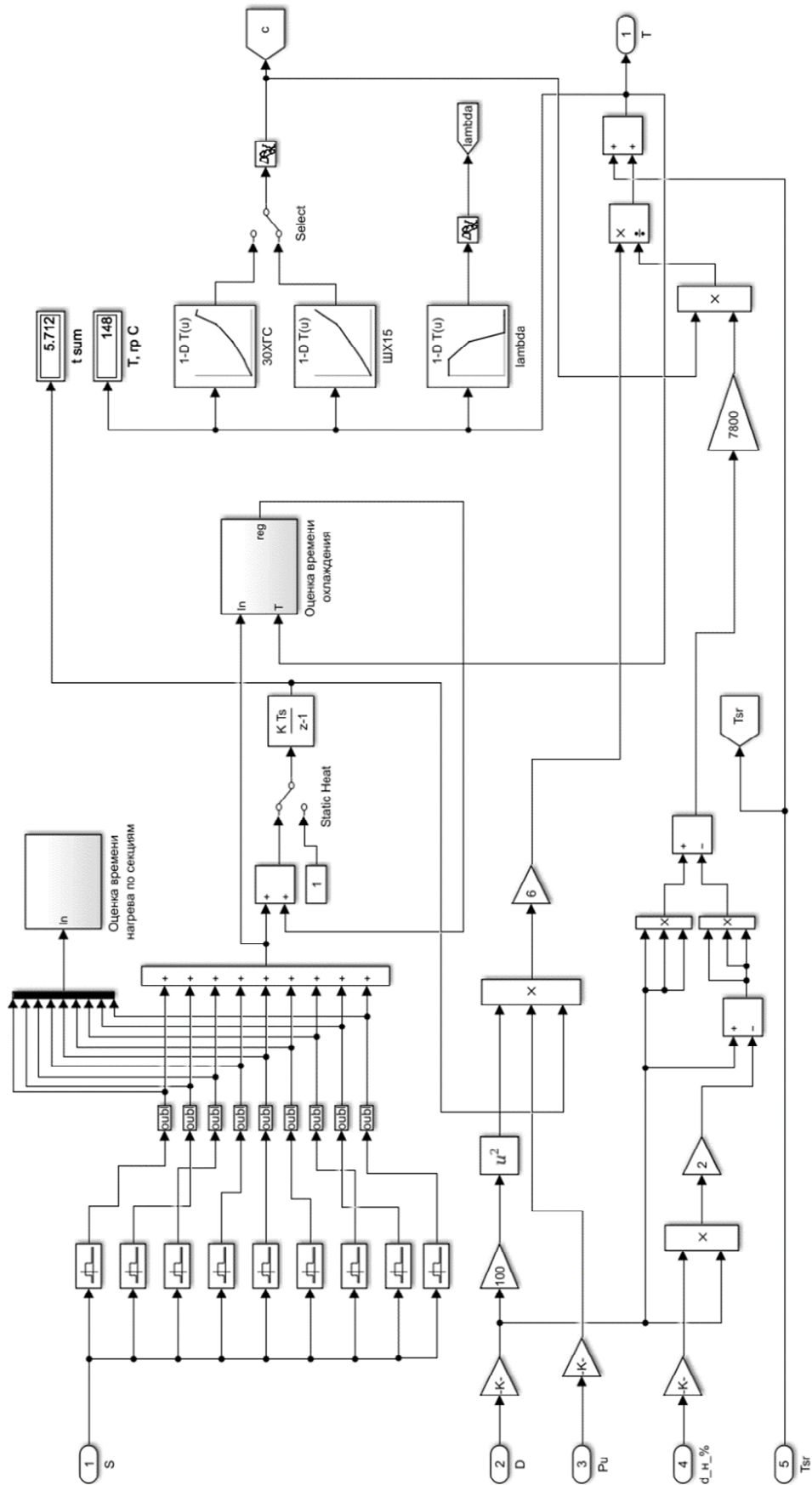


Рис. 3

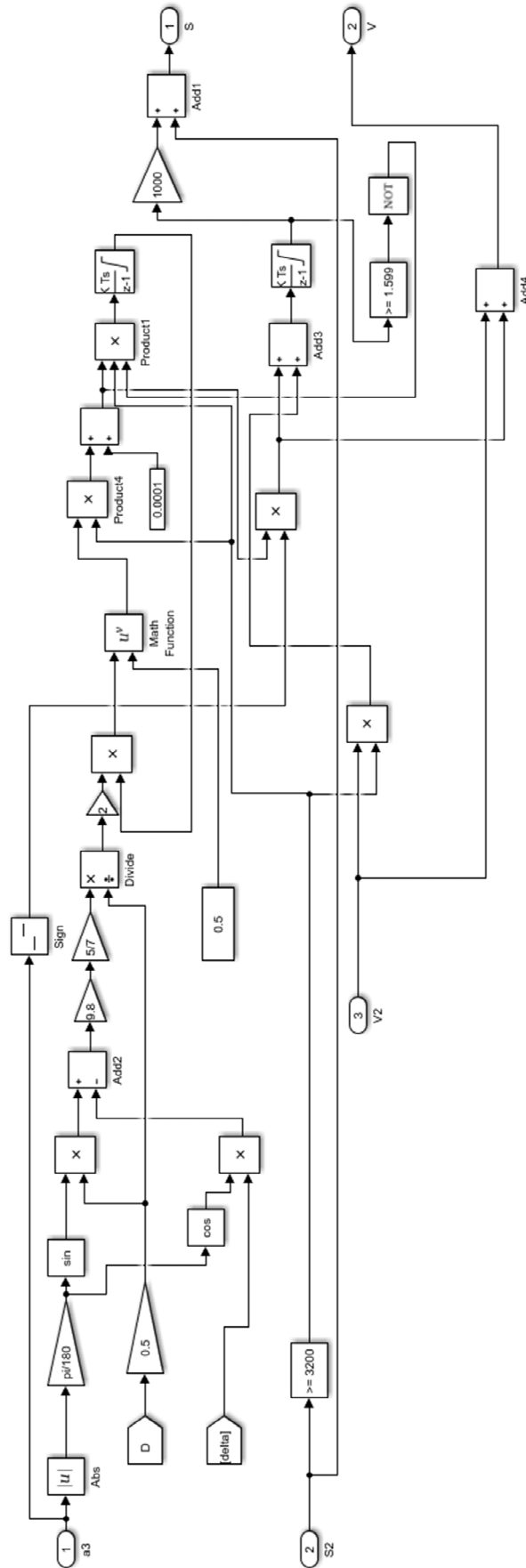


Рис. 5

индицируется время движения шара по каждой из трех транспортирующих трубок (t_1, t_2, t_3) и время нагрева до закалочных $780\text{ }^\circ\text{C}$ (t_{780}).

В блоке «Heat calc» (рис. 3) проводится расчет нагрева и охлаждения шара по формулам (1)–(7). Блок также позволяет моделировать нагрев неподвижного шара при его постоянном нахождении в индукторе с помощью переключателя «Static Heat».

В блоке «Оценка времени охлаждения» (рис. 4) проводится расчет температуры шара по формулам (4), (6) и (7) в моменты нахождения вне областей индукторов.

Блок «Трубка 3» (рис. 5) аналогичен по содержанию блокам «Трубка 1» и «Трубка 2». В нем проводится расчет пути и времени движения шара по транспортирующей трубке по формулам и зависимостям, приведенным далее.

В данном расчете будем использовать уравнение [14]–[15] динамики вращательного движения тела относительно мгновенной оси при его скатывании по наклонной плоскости:

$$J_p \varepsilon = \frac{D_{\text{ш}} G \sin \alpha_{\text{н}}}{2} - M_s, \quad (8)$$

где J_p – момент инерции относительно мгновенной оси, проходящей через точку касания между шаром и опорной поверхностью; ε – угловое ускорение; $\alpha_{\text{н}}$ – угол наклона трубки к горизонту; M_s – момент сопротивления качению.

Уравнения для ускорения $a_{\text{ш}}$, скорости $v_{\text{ш}}$ и длины мгновенного пути $l_{\text{ш}}$, пройденного шаром, при учете коэффициента сопротивления качению δ выводятся из (8) при условиях постоянства угла наклона и момента сопротивления и имеют вид

$$a_{\text{ш}} = \frac{5}{7} \frac{2g}{D_{\text{ш}}} \left(\frac{D_{\text{ш}}}{2} \sin \alpha_{\text{н}} - \delta \cos \alpha_{\text{н}} \right);$$

$$v_{\text{ш}} = \frac{5}{7} \frac{2g}{D_{\text{ш}}} \left(\frac{D_{\text{ш}}}{2} \sin \alpha_{\text{н}} - \delta \cos \alpha_{\text{н}} \right) t;$$

$$l_{\text{ш}} = \frac{5}{7} \frac{2g}{D_{\text{ш}}} \left(\frac{D_{\text{ш}}}{2} \sin \alpha_{\text{н}} - \delta \cos \alpha_{\text{н}} \right) t^2,$$

где t – время от начала движения шара.

Подбор коэффициента сопротивления качению δ , при котором скорректированные расчетные значения приближаются к экспериментальным, дает значение порядка $4.5 \cdot 10^{-5}$ для отшлифованных шаров и $8.2 \cdot 10^{-5}$ для закаленных неотшлифованных шаров с трубкой диаметром 18 мм и $13.0 \cdot 10^{-5}$ для отшлифованных шаров и $14.8 \cdot 10^{-5}$ для закаленных неотшлифованных шаров с трубкой диаметром 24 мм.

Эксперимент. Был проведен ряд экспериментов по нагреву шаров с диаметрами 10, 11, 11.5, 12, 12.7, 17, 18, 19, 19.8 мм параллельно с моделированием с теми же параметрами. Углы наклона транспортирующих трубок секций 1, 2, 3 подбирались опытным путем ($\alpha_{\text{н}1} = 1.8^\circ$, $\alpha_{\text{н}2} = 1.2^\circ$, $\alpha_{\text{н}3} = 1.1^\circ$). Установка меньших углов наклона приводила к застреванию шаров в области муфты, соединяющей соседние транспортирующие трубки. Установка больших углов наклона увеличивала скорость движения шаров, но уменьшала их время нагрева, т. е. температура шаров на выходе установки становилась меньше. Оценка температуры шаров и равномерности нагрева по поверхности проводилась с помощью пирометра СЕМ DT-8865, тепловизора Testo 872-2. Результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4

Диаметр шара, мм	Моделирование		Эксперимент	
	Время движения, с	Температура на выходе, $^\circ\text{C}$	Время движения, с	Температура на выходе, $^\circ\text{C}$
10	8.23	210	9.1	205
11	8.07	208	9.0	205
11.5	8.01	206	8.95	201
12	7.95	205	8.8	202
12.7	7.86	204	8.8	199
17	9.81	198	10.4	193
18	9.65	195	10.3	188
19	9.43	192	10.2	188
19.8	9.25	190	10.1	187



Рис. 6

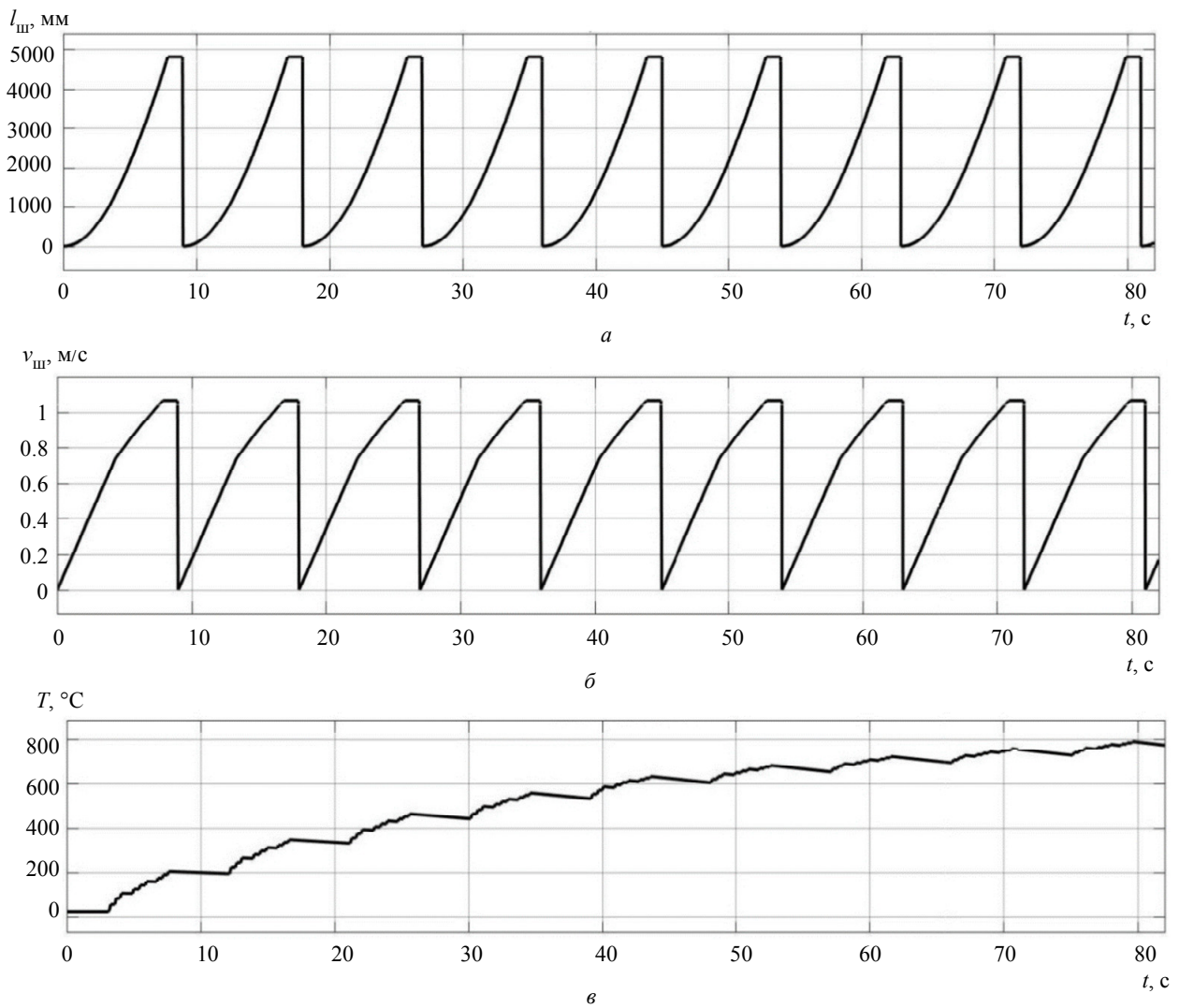


Рис. 7

Результаты показывают, что при любом диаметре шара из используемого типоразмера недостаточно проведения одного прохода шара через установку для нагрева его до закалочной температуры 780 °С. Также наблюдается различие во времени движения шара между экспериментальными данными и данными, полученными при моделировании. Это объясняется некоторым уменьшением скорости шара в моменты движения через области стыков транспортирующих трубок в соединительных муфтах, что проблематично учесть в математической модели.

Для возможности нагрева шара до закалочной температуры 780 °С установка была доработана, что позволило возвращать шары назад во входной бункер, осуществляя тем самым нагрев в несколько проходов. Доработка заключается в установке стальной транспортирующей трубы, закрепленной слева на опорных столах (рис. 6). Во

входной бункер шар возвращается с помощью подачи сжатого воздуха в транспортирующую трубу, для чего в установке был применен компрессор Quattro Elementi DV-400-100 (400 л/мин, 100 л, 3 л.с, 8 бар). Также в математическую модель была добавлена возможность расчета нагрева в несколько проходов.

Результаты и обсуждения. На рис. 7 показаны графики: *a* – пути, в мм, *б* – скорости, в м/с, *в* – температуры для шара диаметром 12.7 мм при нагреве в несколько проходов, полученные с помощью математической модели. На рис. 8 представлены графики: *a* – пути, в мм, *б* – скорости, в м/с, *в* – температуры для шара диаметром 19.8 мм при нагреве в несколько проходов, также полученные с помощью математической модели. Для шара диаметром 12.7 мм потребовалось 9 проходов, для шара диаметром 19.8 мм – 8 проходов. Это объясняется меньшей скоростью охлаждения

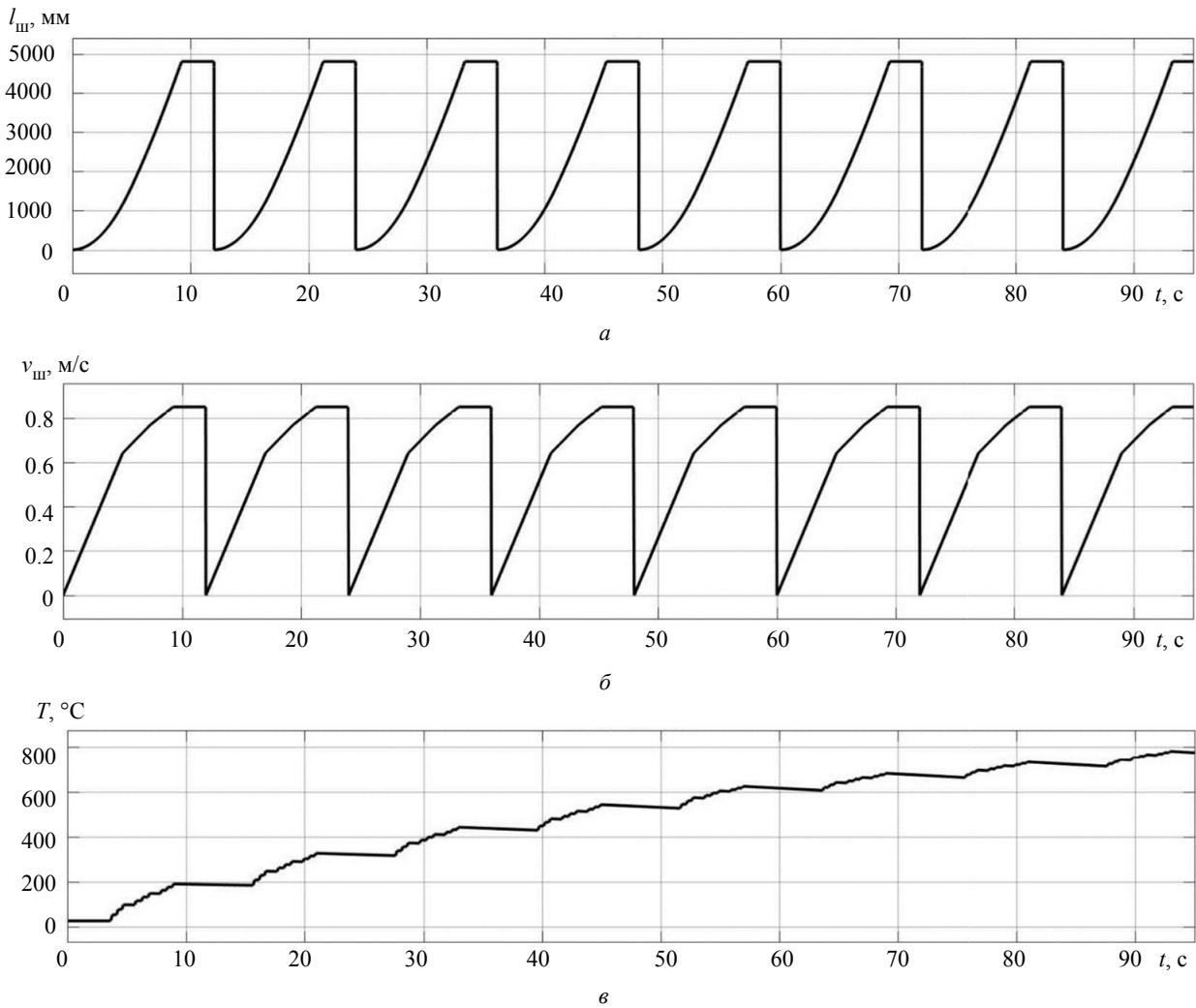


Рис. 8

шаров с большими диаметрами. Для шаров обоих диаметров конечная температура составляет порядка 800 °С.

Результаты экспериментов с шарами данных диаметров дают температуру 780 °С для шара 12.7 мм и 790 °С для шара 19.8 мм за число проходов, аналогичное моделированию. Данные результаты говорят о достижении требуемого – возможности нагревать шары до закалочной температуры 780 °С в поточном режиме.

Для обеспечения нагрева до закалочной температуры за один проход требуется увеличение числа индукционных преобразователей на единицу площади, т. е. необходимо установить как можно большее число индукторов по длине транспортирующей трубки; также требуется увеличить габаритную мощность каждого преобразователя. Это увеличивает массогабаритные показатели и общую стоимость установки – однако и производительность тоже.

В результате проведенной работы были рассчитаны основные технологические параметры экспериментальной установки для индукционного поточного нагрева металлических шаров, а также проведены исследования по поточному индукционному нагреву металлических шаров до закалочной температуры 780 °С. Проведенные исследования показали необходимость использования в данной установке нескольких проходов

для осуществления поточного индукционного нагрева металлических шаров. Сформированы основные требования для повышения производительности установки. Полученные результаты для шаров наиболее распространенных диаметров (в диапазоне до 30 мм) позволили оценить возможность осуществления их поточного индукционного нагрева, что, в свою очередь, дает возможность разработать технические требования для построения установки большей мощности, рассчитанной на обработку наиболее распространенных в промышленности типоразмеров мелющих шаров с диаметрами 40 и 60 мм.

Проведенные исследования позволили практически реализовать установку индукционного нагрева [2] с применением разработанной и запатентованной системы управления [16] и, как следствие, ожидать снижения себестоимости производства металлоизделий шарообразной формы в связи со значительным снижением энергоемкости их термообработки (прямой нагрев на заданную глубину). Также по результатам серии проведенных экспериментов наблюдалось увеличение срока службы указанных изделий до 2 раз (поверхностный нагрев – наличие пластичной сердцевины, т. е. достижение эффекта противораскалываемости в сочетании с симметричностью воздействия) в сравнении с изделиями, термообработанными по традиционной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчет и разработка экспериментальной индукционной установки для симметричной закалки мелющих металлических шаров / В. Н. Мещеряков, О. В. Федоров, С. С. Титов, Д. В. Безденежных // Черные металлы. 2019. № 4. С. 51–57.
2. Пат. 2691354 С1 (РФ). Установка поточного индукционного осесимметричного нагрева изделий шарообразной формы / С. С. Титов, Д. В. Безденежных. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Система48». Заявл. 22.01.2019; опубл. 11.06.2019.
3. Titov S. S., Meshcheryakov V. N. Research on the heat condition of spherical metal bodies in the process of induction flow heating // J. Chem. Technol. Metall. 2020. Vol. 55, № 1. P. 163–170.
4. Установки индукционного нагрева / А. И. Слущоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунэр. Л.: Энергоиздат, 1981.
5. Zinn S., Semiatin S. L. Elements of induction heating. Ohio: ASM Internatuional, 1988.
6. Аксенов Е. П. Специальные функции в небесной механике. М.: Наука, 1986.
7. Rashid M. H. Power Electronics Handbook, second edition. San Diego (USA): Elsevier, 2005.
8. Demidovich V. B. Rudnev V. I., Komrakova G. D. Space change of Eddy current power by induction heating of steel cylinders. Nottingham: University of Nottingham, 1994.
9. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопереноса. М.: Энергия. 1977.
10. Охотин А. С. Теплопроводность твердых тел. М.: Энергоатомиздат, 1984.
11. MATLAB. The language of technical computing. using MATLAB graphics. USA: The Math Works, Inc, 2000.
12. MATLAB. The language of technical computing. external interfaces. USA: The Math Works, Inc., 2000.
13. Simulink. Model based and system based design. using simulink. USA: The Math Works, Inc., 2002.
14. Сивухин Д. В. Курс общей физики. Механика. М.: Физматлит, 2010.

15. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.
16. Пат. 172183 (РФ). Устройство для управления индуктором / С. С. Титов, В. Н. Мещеряков, Д. В. Без-

денежных. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПП Система48». Заявл. 25.10.2016; опубл. 30.06.2017.

S. S. Titov

LLC «Scientific production enterprise „System48“»

V. N. Meshcheryakov, D. V. Bezdenezhnykh

Lipetsk State Technical University

RESEARCH OF THE HEATING PROCESS OF METAL BALLS IN AN INNOVATIVE INDUCTION PLANT

Deals with the study of the process of heating metal balls in an innovative induction plant for in-line axisymmetric heating of metal products with a discrete cross-section area, analyzes the time of heating a metal ball to a given temperature, depending on its parameters and operating modes of the plant, presents the results of modeling processes and experimental studies, as well as their comparison and analysis. To create energetically efficient continuous-action equipment for symmetric heating of spherical metal products to a given depth for heat treatment without oxidation and decarburization is a challenging problem for some industries, including the mass production of milling bodies for ore-dressing and processing enterprises and cement plants, balls for rolling bearings and valves in hydraulic systems, and wear-resistant balls in the backwater gates of deep-well pumps for oil production. Consider plant induction heating of metal balls has a high level of innovation, which is confirmed by patents of the Russian Federation, as well as interest in the development of several industrial enterprises in the Russian Federation (JSC «Oskol electrometallurgical plant» EUROCEMENT group, etc.) and abroad, in particular TENOVA LOI Thermprocess GmbH (Germany) and Magnatech GmbH (Austria).

Induction heating plant, symmetrical induction heating, spherical metal product, high frequency currents, metal ball, quenching
