

УДК 621.646.986

## УСТРАНЕНИЕ ЗАКЛИНИВАНИЯ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ТРУБОПРОВОДА

*А.А. Базаров, Н.В. Бондарева, А.А. Навардян*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы моделирования процессов термической деформации задвижек при снижении температуры окружающей среды. В некоторых видах клиновых задвижек происходит заклинивание, для устранения которого требуется подогрев корпуса. Указанная проблема характерна для задвижек с жестким клином, но причины явления до конца не объяснены. В связи со значительной мощностью электроприводов задвижки иногда наблюдается разрушение штока задвижки.

Целью работы является определение характера распределения напряжений между конструктивными элементами задвижки, приводящих к заклиниванию при снижении температуры окружающей среды, и поиск параметров процесса нагрева, обеспечивающих минимальные энергетические и временные затраты.

Для исследования тепловых процессов в корпусе задвижки разработана численная модель, описывающая передачу тепла в элементах конструкции и жидкости. С тепловой моделью объединена модель упругих деформаций. Это позволяет производить совместные расчеты без внесения дополнительных погрешностей. Возникающие в процессе охлаждения тепловые деформации приводят к непропорциональному изменению размеров задвижки и появлению термонапряжений, являющихся причиной заклинивания. Моделирование процессов тепловой деформации при снижении температуры показало, что в средней плоскости клина возникают силы давления разного знака. На средней по высоте горизонтальной линии возникает сжимающее давление, а в нижней и верхней точках – растягивающее. Для устранения сжимающих усилий произведен локальный подогрев в нескольких областях корпуса. В ходе исследований выяснено, что самым эффективным вариантом является нагрев нижней полусферической поверхности корпуса. Для рассматриваемой задачи нагрев в течение тридцати минут позволяет снизить термонапряжения в клине и, соответственно, сжимающие усилия до минимальных значений, что устраняет заклинивание задвижки. Для нагрева корпуса предусмотрен индукционный нагреватель полусферической формы, имеющий магнитопровод. Предложенная конструкция позволяет использовать напряжение промышленной частоты без понижающего трансформатора и компенсации реактивной мощности.

**Ключевые слова:** задвижка с жестким клином, заклинивание, тепловые деформации, метод конечных элементов.

---

\*Работа над статьей поддержана РФФИ (проект №19-06-00212).

Базаров Александр Александрович (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

Навасардян Ашот Александрович, аспирант.

Бондарева Наталья Викторовна, аспирант.

## **Введение**

В качестве запорной арматуры на нефте- и газопроводах используются различные типы задвижек. Они успешно выполняют функции управления потоками, но имеют определенные недостатки, связанные с износом герметизирующих поверхностей.

Для клиновых задвижек, имеющих жесткий клин, характерна проблема, выражающаяся в заклинивании в условиях снижения температуры окружающей среды. Данное явление проявляется в задвижках с жестким клином одной разновидности конструкции, отличающейся сужением корпуса в нижней части.

Применение сплошного клина в стальных задвижках позволяет обеспечить хорошую герметичность за счет хорошей обработки поверхностей клина и седла [1]. При снижении температуры воздуха относительно значения, при котором произведено закрывание, возможно заклинивание [2]. Подобное явление исключено в задвижках с составным двухдисковым запирающим элементом. Кроме перепадов температуры причинами заклинивания могут быть коррозия и износ уплотняющих поверхностей [3].

Обеспечение герметичности запорного органа при использовании жесткого клина требует тщательной механической обработки прилегающих поверхностей клина и седла. Дополнительно требуется приложение значительных усилий с помощью редукторов и электроприводов [4]. В случае термических деформаций в зимнее время года происходит увеличение сдвигавшего усилия на отдельных участках поверхности клина. В результате для открытия задвижки требуется большее усилие. В таких ситуациях возможен выход из строя электропривода или обрыв штока (шпинделя) задвижки [2]. Кроме разрушения конструктивных элементов возможна перегрузка электропривода, что усугубляется с учетом длительности процесса открывания, достигающего пяти минут.

Проведенные исследования термодформационных процессов на упрощенной численной модели задвижки показали сложный характер процессов и неоднозначность при определении зон нагрева корпуса [5].

Целью работы является исследование процессов охлаждения и последующего локального нагрева, сопровождающихся напряжениями и деформациями конструкции, поиск параметров системы нагрева для эффективного решения проблемы устранения заклинивания задвижек.

На рис. 1 представлена модель конструкции задвижки с жестким клином, корпус которой имеет форму конической оболочки, ограниченной с нижней и верхней сторон фрагментами сферических оболочек. Для упрощения моделирования некоторые внутренние детали не представлены. В целях снижения времени расчета размеры задвижки приняты уменьшенными. Диаметр горизонтальной цилиндрической части модели равен 0,1 м.

## **Формулировка задачи**

Исследованию надежности работы задвижек посвящены работы [6–14], в которых рассматриваются вопросы, связанные с методиками расчета [6; 7], анализом причин разрушения [8; 9], математическим моделированием термонапряжений и деформаций [10–13] и совершенствованием конструкции для улучшения характеристик [14].

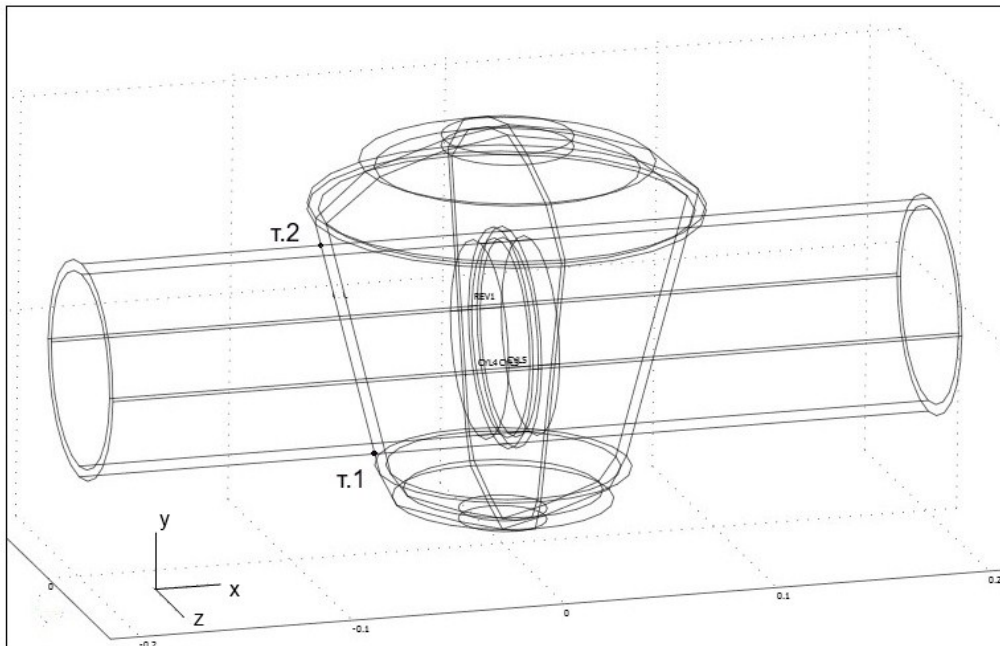


Рис. 1. Геометрическая модель задвижки с конусообразным корпусом

В работе [5] показано, что деформации корпуса и возникающие напряжения в системе «седло – клин» при изменении температуры в силу различия физических свойств и геометрической несимметрии зависят от места расположения рассматриваемых точек. В ходе анализа процессов возникновения напряжений в задвижке выполнено моделирование процессов деформации в симметричной и несимметричной конструкциях и исследование влияния формы на величины деформации и напряжений.

При поиске решения задачи устранения термонапряжений, приводящих к заклиниванию, требуется разработка математических моделей тепловых процессов и процессов упругой деформации в корпусе задвижки [15–17]. Использование связанных (мультифизических) моделей позволяет провести более точные расчеты, так как обеспечивается формирование внутренних источников тепловыделения и распределения температуры с учетом сложной геометрической формы. Для реализации связанной задачи использована программа Comsol.

Тепловые процессы в корпусе задвижки и жидкости внутри нее описываются дифференциальным уравнением в частных производных

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T, \quad (1)$$

которое дополнено граничными условиями на всех свободных поверхностях:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_L - T_{ext}).$$

Здесь  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$Q$  – плотность внутренних источников тепла;

$\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена на поверхностях корпуса задвижки;

$T_L$  – температура внешней поверхности задвижки;

$T_{ext}$  – температура окружающей среды;

$u$  – вектор скорости перемещения жидкости.

При использовании численного метода решения задачи наличие нескольких сред учитывается с помощью задания различных физических параметров для разных областей модели задвижки, заполненной жидкостью. Перенос тепла осуществляется не только за счет теплопроводности, но и за счет движения жидкости, обусловленного конвекцией. Включение в выражение (1) производных температуры по координатам с множителями в виде вектора скорости приводит к необходимости решения гидродинамической задачи. Связанная термогидродинамическая задача характеризуется большой ресурсоемкостью и плохой сходимостью вычислительного процесса даже для двумерной модели. Линеаризация данной задачи затруднена, так как сама природа возникновения конвективного движения жидкости связана с объемным расширением за счет нагрева. Для упрощения модели были проведены исследования процесса нагрева задвижки [5]. Было выяснено, что вихри жидкости имеют две области. В первой области, сосредоточенной в нижней части корпуса, под клином и седлом, вихри имеют небольшие размеры и не выходят за пределы указанной области. Посредством этих вихрей тепло переносится от основания корпуса к клину. Для нижней области допустимая погрешность расчетов достигается при замене конвективного процесса переноса тепла на процессы теплопроводности.

Вторая область расположена выше и характеризуется образованием крупных вихрей, распространяющихся до верхнего уровня жидкости. При расчете процессов переноса тепла между корпусом и внутренними элементами задвижки принято, что максимальное тепловыделение сосредоточено в нижней части. Это позволяет пренебречь погрешностью при упрощении расчетной схемы до односвязной тепловой задачи учета гидродинамических процессов.

Диапазон температур в задвижке при разогреве с помощью индукционных или резистивных нагревателей и одновременном охлаждении на воздухе составляет около 100 градусов, так как имеются ограничения, связанные с недопустимостью перегрева, парообразования или возникновения отложений на стенках.

В качестве материала задвижки используется сталь 35Л. Ее физические свойства приведены в табл. 1. Для процессов теплопередачи и упругой деформации в указанном диапазоне температур коэффициенты можно принять неизменными.

Для жидкости принят коэффициент теплопроводности нефти, равный  $0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ . Неучет гидродинамики вносит погрешность в расчеты, однако компенсируется снижением теплового потока между стенкой корпуса и клином за счет конвективного теплопереноса в верхние слои жидкости. В работе [5] исследованы процессы переноса тепла с одновременным движением жидкости в задвижке. Условия одинаковы для обеих задач. При вертикальной скорости движения жидкости в пределах 2–4 см/с тепловые потоки от стенки в жидкость отличаются на 25 % от значений, полученных в модели без гидродинамики. Это позволяет упростить постановку задачи и сократить время расчета.

Основная проблема, требующая упрощения вычислительного процесса, связана с необходимостью совместного решения задач теплопроводности и упругой деформации [18, 19]. Объединение трех задач, включая гидродинамическую, ставит перед вычислителем нереально тяжелую проблему.

## Физические свойства стали 35Л

Свойство	Ед.	Значения	
Температура	°C	- 20	100
Плотность	кг / м <sup>3</sup>	7831	7804
Коэффициент теплопроводности	Вт / (м·°C)	55	51
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>-6</sup>	1 / °C	12	12.9
Теплоемкость	Джс / (кг·град)		470
Модуль Юнга, ×10 <sup>11</sup>	Па	2,12	2,06
Коэффициент Пуассона		0,287	0,292

**Исследование термонапряжений в корпусе задвижки**

Конструкция содержит клин с большей толщиной в верхней части. Поверхности клина и седла параллельны, что обеспечивает их хорошее прилегание друг к другу. Для исследования построена трехмерная модель.

В качестве геометрической модели принята конструкция, состоящая из горизонтальных участков цилиндрической оболочки (пустотелой трубы), между которыми располагается клин, и вертикальной конической оболочки. Вертикальная часть корпуса сверху и снизу ограничена полусферическими оболочками.

Жидкость в модели заполняет весь внутренний объем корпуса.

Расчет процессов охлаждения и деформации выполнен для диапазона температур окружающей среды от 20 до -20 °C. Модуль Юнга равен  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па. Возникающие деформации и напряжения обусловлены снижением температуры относительно начального значения 20 °C. На плоскости, проходящей через середину линии толщины клина, получено распределение давления, сжимающего клин с обеих сторон, для температуры окружающей среды, равной -20 °C (рис. 2).

Как видно из рис. 2, давление в плоскости клина имеет разную направленность. В верхней и нижней области давление на периферии направлено на создание зазора между клином и седлом, а в средней по высоте области сжимает клин прилегающими участками седла. В центральной части давления отсутствуют, так как клин имеет контакт не с металлическими участками корпуса, а с жидкостью.

Для более детального представления полученных давлений показаны диаграммы распределения на горизонтальной линии, проходящей в указанной плоскости на середине высоты клина при  $y = 0$  (рис. 3).

На горизонтальной линии, проходящей через осевую линию клина (рис. 3), наблюдается симметричная картина давления для разных значений температуры.

Наблюдаемое на рис. 2 отрицательное давление в верхней и нижней областях клина не компенсирует давление в средней по высоте области, так как способствует созданию зазора без контакта с прилегающей поверхностью седла. Таким образом, для устранения заклинивающих напряжений и деформаций требуется разогрев всего корпуса или его отдельных участков.

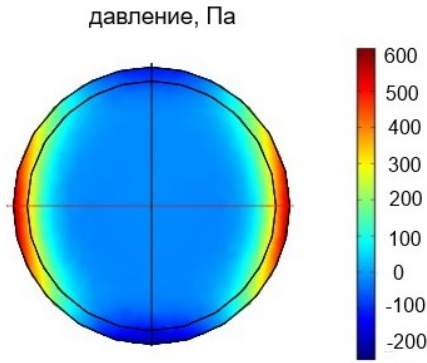


Рис. 2. Распределение давления в плоскости клина задвижки при  $x = 0$

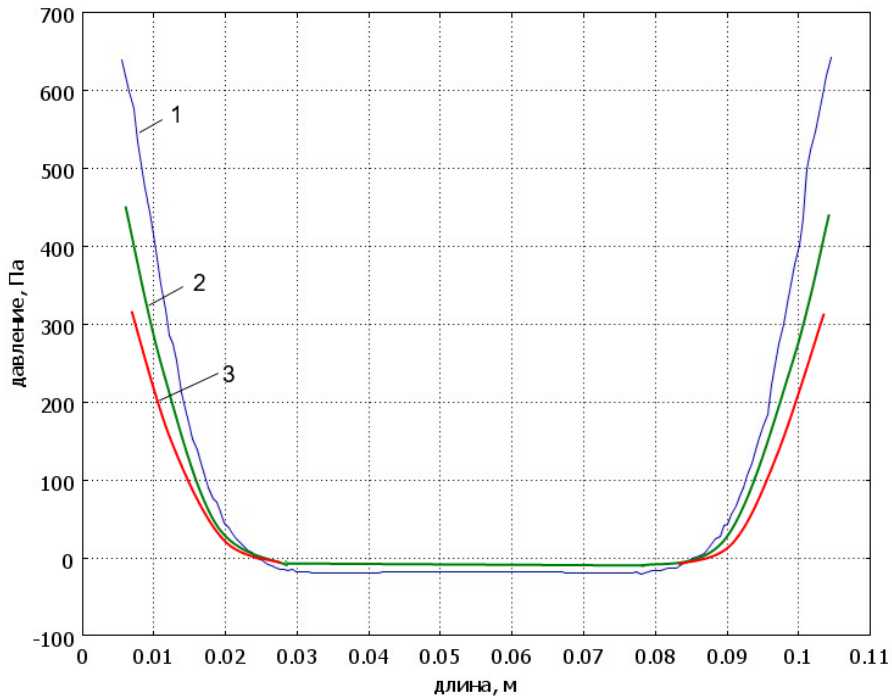


Рис. 3. Диаграммы давления на поперечной линии клина  $x = 0, y = 0, z = [-0,5; 0,5]$  м при охлаждении с  $20\text{ }^\circ\text{C}$  до температуры среды: 1 –  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $0\text{ }^\circ\text{C}$

Моделирование нагрева корпуса с процессами теплопередачи между корпусом и жидкостью выполнено при задании источников тепловыделения в нижней части оболочки. Для управления процессом нагрева предусмотрено регулирование температуры в нижней точке, где достигается максимальное значение. Для реализации функции регулятора температуры использована ступенчатая функция  $H$ , которая позволяет в режиме релейного управления изменять мощность внутренних источников при достижении заданной температуры

$$Q = Q_{\max} \cdot (1 - H(T - T_z)).$$

Здесь  $T_z$  – температура задания.

Результаты решения задачи для задвижки с коническим корпусом представлены на рис. 4. Распределение температуры представлено в плоскостях для координат  $x = -0,2$  м;  $-0,1$  м;  $0$ ;  $0,1$  м;  $0,2$  м. Как видно из распределения температуры, средняя по высоте клина область прогрета до температуры  $50$  °С. Это позволяет гарантированно устранить эффект заклинивания.

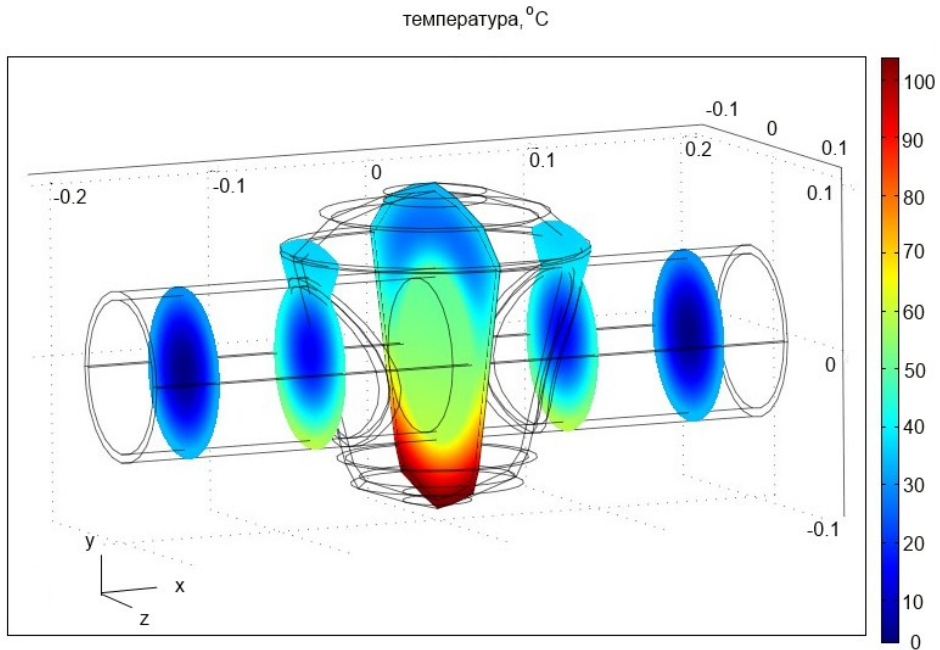


Рис. 4. Распределение температуры в слоях задвижки с трубой после нагрева в течение 2 часов

На рис. 5 представлены диаграммы температуры в нескольких точках, включая точку с датчиком температуры. Как видно из диаграмм, разогрев до исходного значения температуры при запирании задвижки, равного  $20$  °С, происходит в момент времени  $2300$  с. К сожалению, судить по температурам и деформациям в отдельных точках о достаточном снижении заклинивающих усилий в системе «клин – седло» сложно. Поэтому по мере прогрева корпуса задвижки целесообразно периодически подавать кратковременные импульсы на привод задвижки, чтобы проверить возможность открывания.

Мощность тепловыделения в корпусе задвижки при нагреве слабо зависит от температуры, так как диапазон изменения удельного сопротивления невелик, магнитная проницаемость также практически постоянна. Для предотвращения перегрева жидкости возле внутренней стенки используется система релейного регулирования температуры с использованием датчика температуры, прикрепленного к внешней поверхности корпуса. По мере прогрева корпуса и граничащих с ним слоев жидкости среднее значение мощности нагрева снижается. В зависимости от мощности нагревателя разогрев нижней поверхности корпуса происходит за разное время (рис. 6).

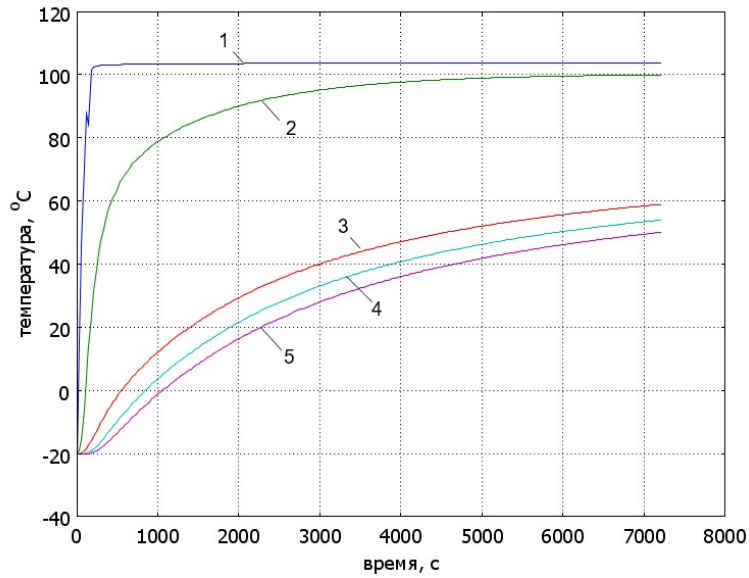


Рис. 5. Временные диаграммы температуры при нагреве задвижки в точках  $x = 0, z = 0$ : 1 –  $y = -0,086$  м; 2 –  $y = -0,08$  м; 3 –  $y = -0,05$  м; 4 –  $y = 0$ ; 5 –  $y = 0,05$  м

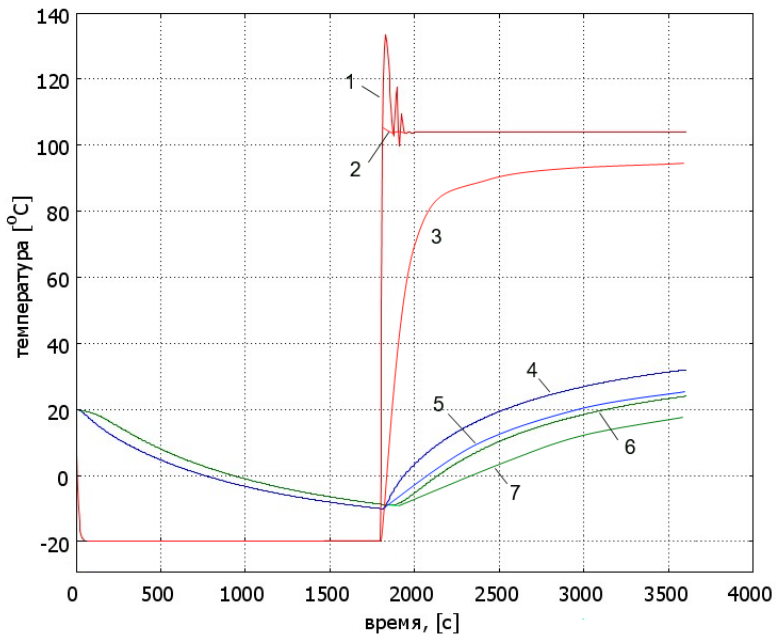


Рис. 6. Диаграммы температуры в точках задвижки при разной мощности тепловыделения:

1 – на поверхности при мощности 4900 Вт; 2 – на поверхности при мощности 2100 Вт; 3 – на поверхности при мощности 136 Вт; 4 – на нижней поверхности клина при мощности 4900 и 2100 Вт; 5 – на верхней поверхности клина при мощности 4900 и 2100 Вт; 6 – на нижней поверхности клина при мощности 136 Вт; 7 – на верхней поверхности клина при мощности 136 Вт



Достижение допустимого значения температуры, равного 100 °С, происходит одинаково быстро при максимальной мощности тепловыделения 4900 и 2100 Вт. Диаграммы температуры в точках на нижней и верхней поверхностях клина совпадают для этих мощностей. Снижение мощности нагрева до 136 Вт приводит к замедлению роста температуры нижней поверхности корпуса, но прогрев клина отстает во времени не столь существенно.

Электромагнитная задача описывается системой уравнений Максвелла, которые затем преобразуются в более удобный вид в терминах векторного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial rA}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial rA}{\partial r} \right] - j\omega A - J_0 = 0; \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;

$\mu_a$  – магнитная проницаемость материалов, определяемая как произведение относительной проницаемости на проницаемость вакуума  $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$ .

В качестве граничных условий принимается равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области:

$$A|_{S_1 \in S} = 0,$$

где  $S_1$  – удаленная граница расчетной области.

Так как задача осесимметричная, то на осевой линии задается равенство нулю производной потенциала.

Для корректного учета нелинейных свойств задачи задается кривая намагничивания. Отличие материала Fluxtrol А от электротехнической стали состоит в том, что максимальное значение индукции при напряженности поля 20000 А/м не превышает 0,8 Тл. Для стали при той же напряженности индукция достигает значения 1,6 Тл. В результате решения электромагнитной задачи определяются значения магнитного потенциала для каждого элемента, по которым производится расчет токов и других переменных.

Объемная плотность внутренних источников тепла, создаваемых в проводящей неподвижной среде, определяется в соответствии с выражением

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left( J_z \sigma^{-1} J_z^* \right).$$

Здесь в скобках показано произведение плотности тока на его комплексно сопряженную величину.

Магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля, поэтому решение нелинейной задачи (2) выполняется итерационным способом.

В работах, посвященных аналогичным электромагнитным задачам, рассмотрены особенности распределения магнитного поля и внутренних источников тепловыделения в нагрузке [20, 21].

Для осуществления нагрева предложена конструкция индуктора, содержащая многослойную катушку и внешний магнитопровод (рис. 7).

Для питания индуктора выбрано напряжение частотой 50 Гц. При определении параметров индуктора были проведены расчеты для конструкции без магнитопровода и с магнитопроводом из разных материалов: электротехнической стали или феррита марки Fluxtrol А (табл. 2). Без магнитопровода энергетические характеристики (КПД и коэффициент мощности) являются неудовлетворитель-

ными и не обеспечивают необходимую мощность без принудительного охлаждения катушки индуктора, что в полевых условиях непрактично и ненадежно.

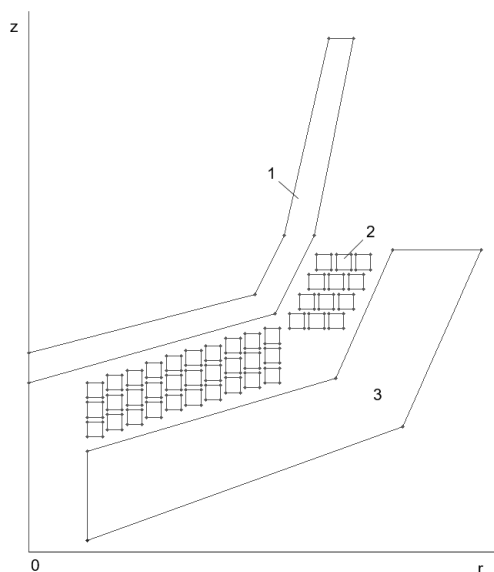


Рис. 7. Индуктор с фрагментом корпуса задвижки:  
1 – корпус; 2 – катушка индуктора; 3 – магнитопровод

Таблица 2

### Параметры индукторов с магнитопроводами

№ п/п	$d$ , мм	$I$ , А	$U$ , В	$P_{заср}$ , Вт	$P_{инд}$ , Вт	$S$ , ВА	$\cos \varphi$	$\eta_3$
1	–	400	22	305	2018	8800	0,23	0,151
2	10 (F1)	400	33	825	2552	13200	0,193	0,323
3	20 (F1)	400	34	888	2615	13600	0,192	0,34
4	20 (ст)	400	35	914	2643	14000	0,188	0,346
5	20 (F1)	200	18	210	642	3600	0,178	0,327
6	20 (ст)	200	18	216	648	3600	0,18	0,333

На рис. 8 показано распределение индукции в системе «индуктор – нагрузка – магнитопровод», где видно значительное ослабление поля рассеяния за пределами магнитопровода. Проведенные расчеты для магнитопровода из стали (ст) или феррита (F1) продемонстрировали слабое влияние материала на энергетические характеристики нагревателя. Толщина магнитопровода  $d$  больше 20 мм становится избыточной, так как дальнейшее повышение КПД и коэффициента мощности практически незаметно.

В расчетах получено минимальное значение магнитной проницаемости на поверхности корпуса задвижки, равное 120. На расстоянии 10 мм от поверхности проницаемость увеличивается до 1000. Аналогичные показатели наблюдаются в магнитопроводе, если он изготовлен из электротехнической стали. При замене

стали на феррит минимальное значение составляет 120, а максимальное 130, то есть при толщине магнитопровода 20 мм поле ослабляется не полностью и частично выходит за пределы магнитопровода. Однако полученные характеристики индуктора позволяют сделать вывод об эффективности магнитопровода даже с ограниченной толщиной.

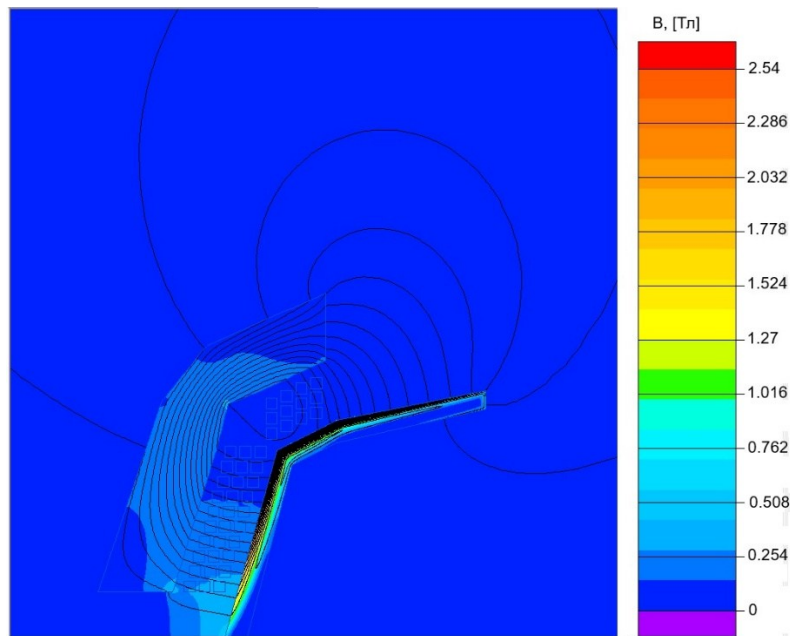


Рис. 8. Распределение индукции в системе «индуктор – корпус – магнитопровод» при токе 200 А и магнитопроводе из стали

Анализ результатов расчета показал степень влияния вида материала магнитопровода на энергетические характеристики системы нагрева. При одинаковых токах индуктора значение мощности тепловыделения в корпусе больше на 3 % при использовании магнитопровода из стали. Выбор материала для магнитопровода зависит от удобства сборки конструкции. При использовании электротехнической стали для предотвращения замыкания токов вдоль пластин требуется располагать пластины веером, что создает проблемы с их креплением. При использовании феррита предполагается применение прямоугольных пластин, которыми нужно выложить внутреннюю поверхность шаблона в виде полусферы.

Приведенные в табл. 2 значения напряжений индуктора соответствуют количеству витков на рис. 7. Для упрощения модели размеры проводников взяты больше, чем это возможно в реальной конструкции. Это позволяет за счет подбора сечения проводников обеспечить согласование с сетевым напряжением, изменяя количество витков.

Для упрощения системы подогрева задвижки целесообразно использование индуктора полусферической формы с внешним магнитопроводом из феррита марки Fluxtrol А. Активная мощность индуктора для задвижки с условным диаметром 100 мм с учетом КПД индуктора составляет 650 Вт. Для снижения реактивных токов в сети и цепях коммутации необходима установка компенсирующего конденсатора мощностью 3600 кВАр (емкость 23,3 мФ).

## Выводы

Выполненный комплекс расчетов позволяет решить задачу устранения заклинивания задвижки. Выявленной причиной является возникновение непропорциональных деформаций и напряжений в системе «седло – клин». Разогрев отдельных областей задвижки до определенной температуры позволяет уменьшить напряжения и сдвливающие силы до минимальных значений, не препятствующих подъему клина. Некоторая неопределенность параметров для внешней и внутренней среды (температура воздуха, скорость ветра, вязкость жидкости, наличие полости с газом) не позволяет найти точно мощность и время нагрева. Поддержание максимального значения температуры в точке контроля предотвращает перегрев, но этой информации недостаточно для построения полной картины распределения температуры внутри задвижки.

## Заключение

Исследование процесса охлаждения задвижки и возникновения термонапряжений, приводящих к заклиниванию, выявило основную причину заклинивания и определило пути его устранения с помощью подогрева нижнего участка корпуса. Ввиду сложности общей картины термонапряжений в системе «клин – седло» для ускорения процесса открывания задвижки целесообразно периодически подавать напряжение питания на электропривод задвижки. Для подогрева корпуса задвижки разработана система индукционного нагрева с контролем температуры корпуса.

Предлагаемые мероприятия позволят повысить быстродействие систем управления задвижками и их надежность.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Жук Д.И., Гаффанов Р.Ф., Щенятский А.В.* Анализ влияния механических воздействий на уплотнительные поверхности запорно-регулирующей трубопроводной арматуры / Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. 2016. Т. 19. № 2. С. 27–29.
2. *Подрезова И.С., Шутова Л.В., Ульянова Ю.Е., Пугачева О.Ю., Елжов Ю.Н.* Анализ причин заклинивания и обрывов штоков трубопроводной электроприводной арматуры // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 4 (13). – С. 32–37.
3. *Настека В.В., Коренякин А.Ф., Низамов Н.Ф., Чирков Е.Ю., Кушнаренко В.М., Каменев С.В.* Напряженно-деформированное состояние металла корпусов фонтанной арматуры до и после наплавки // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. № 1 (150). С. 212–218.
4. *Какузин В.Б., Филиппов Н.Г. и др.* Проблемы настройки электроприводов задвижек // Арматуростроение. – 2008. – № 4 (55). – С. 74–76.
5. *Bazarov A.A., Bondareva N.V., Navasardyan A.A.* Heat System for Rigid Wedge Valves / Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). 2021. Vol. II. Pp. 1277–1287.
6. *Кузнецова Н.В.* Трубопроводная арматура. Конструирование и расчет задвижек стальных клиновых: Монография. – М.: Спутник, 2010. – С. 175.
7. *Гаффанов Р.Ф., Сериков Д.Ю.* Недостатки методики расчета наплавки на примере клиновых задвижек и сильфонных клапанов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности, 2019. – № 7. – С. 38–41.
8. *Муратаев Ф.И.* Исследование разрушения литого корпуса задвижки магистрального нефтепровода // Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Под общ. ред. С.В. Юдиной. – М.: Перо, 2017. – С. 27–32.

9. *Закирничная М.М., Кульшарипов И.М., Чернова А.Ю.* Оценка напряженно-деформированного состояния запорной арматуры с учетом рабочих параметров на примере клиновой задвижки ЗКЛ2 300-25 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М.: Тест-зл, 2016. – Т. 82. – № 11. – С. 61–66.
10. *Закирничная М.М., Кульшарипов И.М.* Особенности расчета ресурса безопасной эксплуатации клиновых задвижек с учетом рабочих параметров в технологических трубопроводах // Нефтегазовое дело. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2016. – Т. 14. – № 4. – С. 121–125.
11. *Барботько М.А.* Численное моделирование термических напряжений и деформаций в цилиндре с упругопластической оболочкой и вязкоупругим наполнителем // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2018. – № 4 (37). – С. 16–23.
12. *Глухов В.И., Шалай В.В., Гриневич В.А., Панин Ю.Н.* Геометрическое моделирование деталей клинового затвора для обеспечения герметичности задвижек // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 8-й Международной научно-технической конференции. – Омск: Омский государственный технический университет, 2018. – С. 193–194.
13. *Майский Р.А., Чернова А.Ю.* Возможности программных комплексов на основе метода конечных элементов при оценке работоспособного состояния элементов трубопроводной арматуры // Информационные технологии. Проблемы и решения. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2014. – № 1–2. – С. 47–49.
14. *Васильев А.С., Суханов Ю.В., Щукин П.О., Галактионов О.Н.* Совершенствование эксплуатационных показателей запорной трубопроводной арматуры // Инженерный вестник Дона. – Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Южный федеральный университет, 2014. – № 3 (30). – С. 14.
15. *Лыков А.В.* Теплообмен. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
16. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
17. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
18. *Берникер Е.И.* Посадки с натягом в машиностроении: Справ. пособие. – М.–Л.: Машиностроение, 1966. – 168 с.
19. *Алферов В.И., Стешенкова Н.А.* Применение МКЭ для решения тепловой и деформационной задач расчета сварочных деформаций судовых корпусных конструкций // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2010. – № 56 (340). – С. 147–162.
20. *Глушко А.В., Логинова Е.А., Астахова Е.В.* Новая задача термоупругости в плоскости с разрезом // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Физика. Математика. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2018. – № 2. – С. 156–172.
21. *Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Чаплыгин Е.А., Сабокарь О.С.* Индукционный нагрев ферромагнетиков плоским круговым многовитковым соленоидом // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2015. – Вып. 70. – С. 113–118.
22. *Mannafov E., Galunin S., Yermekova M., Nikanorov A., Nacke B.* Numerical simulation, investigation and development of induction systems for heating of disks with complex profile // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, pp. 606–608, 8656912.

*Статья поступила в редакцию 10 апреля 2021 г.*

## RIDDANCE JAMMING OF PIPELINE SHUT-OFF VALVES

*A.A. Bazarov, N.V. Bondareva, A.A. Navardyan*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *The paper considers the problems of modeling the processes of thermal deformation of valves with an ambient temperature decrease. Some type of wedge valves are exposed to jamming. Heating the valve body is used to eliminate jamming. This problem is common for rigid wedge valves but the reasons not fully explained. Sometimes the valve stem is destroyed due to the significant power of the gate valve electric drives. The aim of the study is to determine the nature of the stress distribution between the structural elements of the valve, which are the cause of jamming with an ambient temperature decrease, and to search for the parameters of the heating process that ensure minimum energy consumption and time.*

*To study the thermal processes in the valve body, a numerical model describing the heat transfer in the structural elements and the fluid is developed. The thermal model is combined with the elastic deformation model. That allows to make compatible calculations without introducing additional errors. The thermal deformations appear in the cooling process and give rise to disproportionate changes in valve dimensions and thermal stresses. Thermal stresses are the cause of jamming. Modeling of the processes of thermal deformation with a decrease in temperature showed that pressure forces of different signs arise in the middle plane of the wedge. At the average height of the horizontal line, there is a compacting pressure and at the lower and upper points there is a stretching pressure. To eliminate the compacting forces local heating was performed in several areas of the body. It was found that the most effective option is to heat the lower hemispherical surface of the body. Heating for thirty minutes reduces the thermal stresses in the wedge and compressive forces to minimum values. For this reason, jamming of the valve is eliminated. For heating the body, a hemispherical induction heater with a magnetic core is provided. The proposed design allows the use of industrial frequency voltage without a step-down transformer and reactive power compensation.*

**Keywords:** *Rigid wedge valve, jamming, thermal deformation, finite elements method.*

### REFERENCES

1. Zhuk D.I., Gaffanov R.F., Shchenyatskiy A.V. Analiz vliyaniya mekhanicheskikh vozdeystviy na uplotnitelnye poverkhnosti zaporno-reguliruyushchey armatury / Vestnik IZhGTU imeni M.T. Kalashnikova. Izhevsk: Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. M.T. Kalashnikova, 2016. Vol. 19, № 2. Pp. 27–29.
2. Podrezova I.S., Shutova L.V., Ulyanova Yu.Ye., Pugacheva O.Yu., Yelzhov Yu.N. Analiz prichin zaklinivaniya i obryvov shtokov truboprovodnoy elektroprivodnoy armatury // Globalnaya yadernaya bezopasnost. 2014. № 4(13). Pp. 32–37.
3. Nasteka V.V., Korenyakin A.F., Nizamov N.F., Chirkov Ye.Yu., Kushnarenko V.M., Kamenev S.V. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye metalla krpusa fontannoy armatury do i posle naplavki / Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. Orenburg: Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet, 2013. № 1 (150). Pp. 212–218.
4. Kakuzin V.B., Filippov N.G. i dr. Problemy nastroyki elektroprivodov zadvizhek // Armaturstroenie. 2008. № 4 (55). Pp. 74–76.

---

*Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Nataliya V. Bondareva, Postgraduate Student.  
Ashot A. Navardyan, Postgraduate Student.*

5. *Bazarov A.A., Bondareva N.V., Navasardyan A.A.* Heat System for Rigid Wedge Valves // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Vol. II. 2021. Pp. 1277–1287.
6. *Kuznetsova N.V.* Truboprovodnaya armatura. Konstruirovaniye i raschet zadvizhek stalnykh klinovykh. Moscow: Sputnik, 2010. 175 p.
7. *Gaffanov R.F., Serikov D.Yu.* Nedostatki metodiki rascheta naplavok na primere klinovykh zadvizhek i silfonnykh klapanov. Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. Moscow: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut organizatsii, upravleniya i ekonomiki neftegazovoy promyshlennosti, 2019. № 7. Pp. 38–41.
8. *Muratayev F.I.* Issledovaniye razrusheniya litogo korpusa zadvizhki magistralnogo nefteprovoda. Professionalnye kommunikatsii v nauchnoy srede – faktor obespecheniya kachestva issledovaniy. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pod obsch. red. S.V. Yudinoy. Moscow: Pero, 2017. Pp. 27–32.
9. *Zakirnichnaya M.M., Kulsharipov I.M., Chernova A.Yu.* Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zapornoy armatury s uchedom rabochikh parametrov na primere klinovoy zadvizhki ZKL2 300-25. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Moscow: Test-zl, 2016. Vol. 82. № 11. Pp. 61–66.
10. *Zakirnichnaya M.M., Kulsharipov I.M.* Osobennosti rascheta resursa bezopasnoy ekspluatatsii klinovykh zadvizhek s uchedom rabochikh parametrov v tekhnologicheskikh truboprovodakh. Neftegazovoe delo. Ufa: Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet, 2016. Vol. 14, № 4. Pp. 121–125.
11. *Barbotko M.A.* Chislennoye modelirovaniye termicheskikh napryazheniy i deformatsiy v tsilindre s uprugoplasticheskoy obolochkoy i vyazkouprugim zapolnitelem // Vestnik inzhenernoy shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta. Vladivostok: Dalnevostochnyy federalnyy universitet, 2018. № 4 (37). Pp. 16–23.
12. *Glukhov V.I., Shalay V.V., Grinevich V.A., Panin Yu.N.* Geometricheskoye modelirovaniye detaley klinovogo zatvora dlya obespecheniya germetichnosti zadvizhek // Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. Materialy 8-y mezhhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2018. Pp. 193–194.
13. *Mayskiy R.A., Chernova A.Yu.* Vozmozhnosti programnykh kompleksov na osnove metoda konechnykh elementov pri otsenke rabotodosobnogo sostoyaniya elementov truboprovodnoy armatury // Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya. Ufa: Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet, 2014. № 1–2. Pp. 47–49.
14. *Vasilyev A.S., Sukhanov Yu.V., Shchukin P.O., Galaktionov O.N.* Sovershenstvovaniye ekspluatatsionnykh pokazateley zapornoy truboprovodnoy armatury // Inzhenernyy vestnik Dona. Rostov-na-Donu: Severo-Kavkazskiy nauchnyy tsentr vysshey shkoly federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professionalnogo obrazovaniya Yuzhnyy federalnyy universitet, 2014. № 3 (30). P. 14.
15. *Lykov A.V.* Teplomassooben. Moscow: Energiya, 1971. 560 p.
16. *Seeger L.* Primeneniye metoda konechnykh elementov. Moscow: Mir, 1979. 392 p.
17. *Zenkevich O.* Metod konechnykh elementov v tekhnike. Moscow: Mir, 1975. 541 p.
18. *Alferov B.I., Steshenkova N.A.* Primeneniye MKE dlya resheniya teplovy i deformatsionnoy zadach rascheta svarochnykh deformatsiy sudovykh korpusnykh konstruksiy. Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova. Saint Petersburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2010. № 56 (340). Pp. 147–162.
19. *Glushko A.V., Loginova Ye.A., Astakhova Ye.V.* Novaya zadacha termouprugosti v ploskosti s razrezom // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 2018. № 2. Pp. 156–172.
20. *Gnatov A.V., Argun Sh.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S.* Induktсионnyy nagrev ferromagnetikov ploskim krugovym mnogovitkovym solenoidiv // Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilnodorognogo universiteta. 2015. Vol. 70. Pp. 113–118.
21. *Mannanov E., Galunin S., Yermekova M., Nikanorov A., Nacke B.* Numerical simulation, investigation and development of induction systems for heating of disks with complex profile // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, El-ConRus 2019. Pp. 606–608, 8656912.