

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.365

### ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF THERMAL INFLUENCE OF ELECTROTHERMAL SYSTEMS

Конесев С.Г., Хлюпин П.А.  
ФГБОУ ВПО Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет

S.G.Konesev, P.A. Khlupin  
FSBEI Ufa state petroleum technical  
university

Проведен сравнительный анализ процесса нагрева трубы индукционной системой и системой с саморегулирующимся резистивным кабелем. Наглядно показаны температурные режимы обеих систем. Обоснованы преимущества индукционной системы нагрева.

A comparative analysis of the heating tube induction system and a system with self-regulating resistive cable. Clearly shows the temperature regimes of both systems. These advantages of induction heating systems.

**Ключевые слова:** индукционная система, саморегулирующийся кабель, полупроводниковая матрица, термоизображение, тепловое поле.

**Keywords:** induction system, a self-regulating cable, semiconductor matrix, thermo-image, thermal field.

Процессам добычи, подготовки, перекачки и переработки углеводородов сопутствует термическое воздействие, которое необходимо для регулирования реологических свойств нефти, а также для отделения примесей и воды из нефтяной эмульсии.

Температура нагрева нефти при транспорте по магистральным трубопроводам не должна быть ниже температуры кристаллизации парафина и не должна превышать 70 °С, чтобы не допустить выкипания легких углеводородных фракций. Повышение температуры позволяет добиться текучести нефти и создать оптимальные условия введения депрессорной присадки для снижения гидравлических потерь [1].

Для нагрева нефтяной эмульсии помимо паровых систем используются пламенные (факельные) печи, работающие на принципе сжигания углеводородов и обеспечивающие режим «локального разогрева». В настоящее время широко стал применяться нагрев с помощью электрической энергии. В основном, электротермические системы обеспечивают режим поддержания температуры на всей протяженности трубопровода, называемый «попутным электроподогревом».

Наиболее известными электротермическими системами, применяемыми в трубопроводном транспорте, являются системы косвенного индукционного нагрева (skin-системы), а также системы, построенные на основе нагревательных кабелей (лент). Существующие типы кабелей подразделяются на среднетемпературные, с температурой нагрева до 200 °С, и высокотемпературные, с температурой нагрева до 1000 °С [2]. Для попутного нагрева тех-

нологических труб, трубопровода, цистерн и резервуаров используются саморегулирующиеся нагревательные кабели, нагревательные кабели постоянной мощности, кабели с минеральной изоляцией [3]. Также для формирования теплового поля применяются нагревательные ленты шириной от 25 до 80 мм, длиной от 3 до 40 м и толщиной 1,5 мм. Их монтаж значительно проще, чем паровых и факельных систем, поскольку кабель располагается на поверхности трубопровода, легко крепится к нему и может повторять контур трубопровода [4].

Применение резистивных нагревательных кабелей и лент сопряжено с высокими требованиями к монтажу и подключению. На участках трубопровода большой протяженности нагревательные кабели соединяются в одну последовательную линию, в результате чего образуются зоны локального перегрева. Из-за неплотного прилегания кабеля к поверхности трубы возможно снижение эффективности нагрева вследствие возрастания теплового сопротивления. При этом кабель имеет электрическую и тепловую изоляции, которые значительно снижают эффективность теплопередачи.

Развитие технологий привело к созданию саморегулирующихся нагревательных кабелей, выделение тепла в которых регулируется полупроводниковой матрицей, поскольку её проводимость зависит от температуры. Применение полупроводниковой матрицы позволило не только осуществлять саморегулирование процесса, но также и увеличить теплоотдачу кабеля, сократив при этом потребление электрической энергии [5].

К недостаткам саморегулирующихся кабелей относятся: сложность структуры полупроводниковой матрицы, состояние которой в процессе эксплуатации сложно проверить и оценить; узкий диапазон регулирования температуры, вызванный особенностями полупроводниковой матрицы; высокая температура кабеля; большие пусковые токи.

Этих недостатков лишена индукционная система нагрева током повышенно-средней частоты [6]. Функционально индукционная электротермическая система может быть представлена из нескольких основных блоков: индуктор (как правило, «литцендратный» медный провод, в термоизоляции), блок питания, обеспечивающий питание индуктора токами повышенно-средней частоты (до 30 кГц), и система управления мощностью. Благодаря тому, что тепло формируется внутри объекта нагрева (стенки трубопровода), а не передается, как в случае с нагревательным кабелем, через зону контакта, КПД теплопередачи составляет 98 %, а температура самого индуктора сравнительно невысока. Кроме того, возможно расположение индуктора поверх слоя изоляционного материала, обеспечивающего тепловую изоляцию трубопровода и индуктора.

Для сравнения процесса формирования теплового поля, скорости и эффективности нагрева, авторами был создан экспериментальный стенд (рисунок 1). Он состоит из двух, независимых друг от друга, одинаковых отрезков труб из углеродистой стали марки Ст20. Источником тепла для одной трубы является саморегулирующийся кабель, намотанный витками по длине трубы, с равным шагом, для другой - индуктор, расположенный на трубе аналогичным способом.



Рисунок 1. Испытательный стенд

Характеристики индукционного и саморегулирующегося нагревательного кабеля приведены в таблице 1.

Источниками питания обеспечивается потребляемая каждым из кабелей мощность – 0,8 кВт. Обе трубы находятся в одинаковых условиях, при температуре окружающего воздуха 0°С. Процесс передачи тепла контролировался с помощью тепловизора от начального момента времени до установившегося значения температуры нагрева.

Таблица 1. Характеристики индукционного и саморегулирующегося кабелей

Кабель	Тип	Минимальный размер	Длина, м	Мощность, кВт	Частота питающей сети, Гц	Стоимость 1 метра кабеля, руб
Индукционный кабель	РКГМ	6 мм <sup>2</sup>	27	0,8	2000-8000	27
Саморегулирующийся нагрев. кабель	95ФСУ2-СФ	11,9x5,6 мм	11	0,8	50-60	967

В течение всего эксперимента проводился контроль температуры поверхности трубы, а также температур саморегулирующегося и индукционного кабелей. На рисунке 2 представлены термографические изображения объектов с индукционным и резистивным нагревом по истечению 90 минут работы систем. По изображениям видно что, за одно время труба с индукционной системой нагрелась значительно больше, чем труба с системой резистивного нагрева.

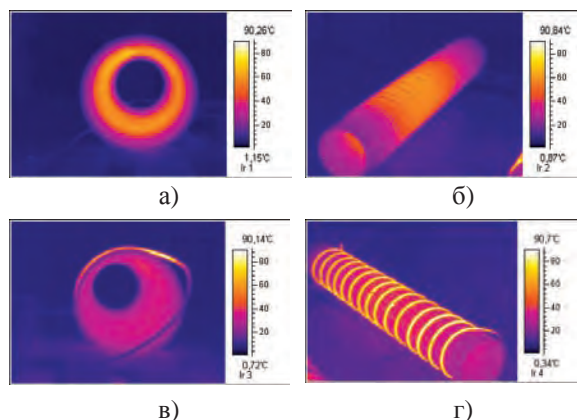


Рисунок 2. Термографическое изображение объектов с индуктором (а, б) и саморегулирующимся кабелем (в, г) через 90 минут

Результаты измерений представлены на графике (рисунок 3).

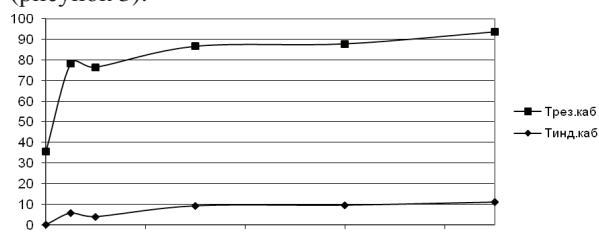
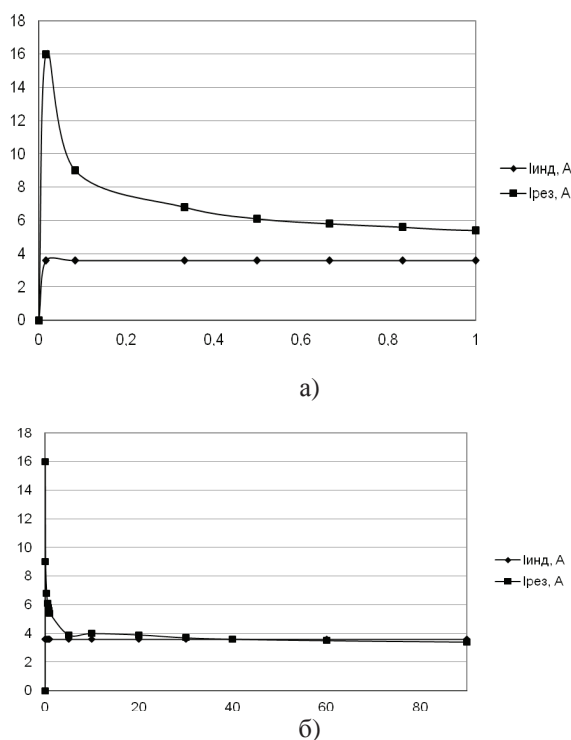


Рисунок 3. График изменения температуры индукционного и саморегулирующегося кабеля от времени

Температура на поверхности нагревательного кабеля не опускается ниже 80 °С, и по окончании эксперимента составляет 93 °С. В свою очередь температура на поверхности индукционного кабеля не превышает 12°С, так как выделяемое тепло в индукторе сравнительно мало, а изоляция индуктора позволяет выдержать температуру нагреваемого объекта.

Резкому повышению температуры способствует мгновенный скачок потребляемого тока саморегулирующимся кабелем, значение которого на первых

секундах достигает 16 А. Такой скачок потребляемого тока, при малых мощностях, не сильно отразится на сети. Однако требуемые для нефтегазовой промышленности нагревательные системы по своей мощности в 10 – 100 раз превышают мощность экспериментальной установки. И в случае одновременного пуска резистивных нагревательных систем возможно снижение напряжения и как следствие потеря питания на основных рабочих электрических узлах, что недопустимо в нефтяной и газовой промышленности. Также на входе системы необходимо устанавливать коммутационную аппаратуру с завышенными характеристиками по рабочему току, что скажется на цене системы. Индукционная система, той же мощности, потребляет меньший ток, который в течение всего эксперимента остается неизменным по значению. Значение тока, потребляемого индуктором, на протяжении всего эксперимента практически неизменно и равно 3,6 А (рисунок 4).



а) в течение первой минуты; б) в течение всего времени работы установки

Рисунок 4. Потребляемый ток индукционной и резистивной системой нагрева

По данным, полученным в результате эксперимента, можно утверждать, что индукционная система на повышено-средних частотах превосходит систему с саморегулирующимся кабелем (рисунок 5). При одинаковых начальных условиях установившееся значение температуры трубы с индукционным нагревом составила 60 °С, а с саморегулирующимся 40 °С.

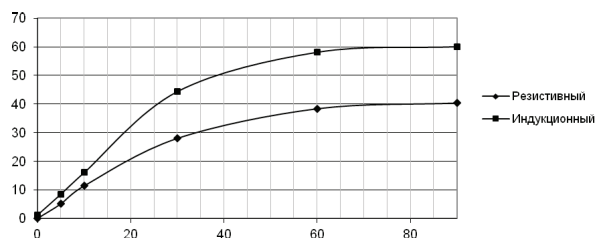


Рисунок 5. Изменение температуры трубы во времени при различных системах нагрева

Из графика (рисунок 5) видно что, при индукционном нагреве температура трубы, например 40 °С, достигается в 2,6 раза быстрее, чем при системе с саморегулирующимся кабелем.

В зависимости от фракционного состава температура вспышки нефти находится в пределах от 30 до 120 °С. Чем больше в нефти легких фракций, тем ниже температура вспышки и тем опаснее становится процесс нагрева. Если саморегулирующийся нагревательный кабель будет расположен на объекте без изоляции, или в случае если изоляция по каким-либо причинам будет нарушена, то он может стать причиной техногенной аварии.

По результатам анализа индукционной электротермической системы и системы с саморегулирующимся нагревательным кабелем сделаны следующие

#### ВЫВОДЫ:

- пусковой ток саморегулирующегося кабеля в начальный момент времени в несколько раз превышает рабочий, что при больших мощностях приведет к посадке напряжения в сети и может вывести из строя основное электрооборудование. Потребляемый ток индукционным кабелем в течение всего процесса нагрева остается неизменным;
- скорость нагрева трубы индукционным кабелем в 2,6 раза выше, чем у саморегулирующегося кабеля;
- для нагрева до заданной температуры индукционная электротермическая система потребляет из сети в 2,9 раза меньше мощности, чем система с саморегулирующимся кабелем.
- Индукционная электротермическая система обеспечивает большой диапазон регулирования потребляемой мощности, и поэтому может реализовать работу в двух режимах: разогрева трубопровода и компенсации тепловых потерь, без конструктивного изменения индуктора. При разогреве и выходе на заданную температуру, система позволяет понизить мощность, выделяемую в индукторе и перейти в режим поддержания температуры. Потребляемая мощность при переходе в режим компенсации тепловых потерь снижается на порядок;
- индукционные электротермические системы более безопасны, поскольку нагрев самого индуктора не превышает рабочих температур силовых питающих кабелей;
- возможность монтажа индуктора поверх изоляции, значительно повышает эффективность



нагрева и промышленную и пожарную безопасность покрытий и снижении их толщины, эффективность системы. При современном развитии изоляционных индукционных систем становится неоспоримой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тогашева А.Р. Технология транспорта высокопарафинистых нефтей на основе применения депрессорных присадок: автореф. дисс. канд. тех. н. Уфа, 2007. 22 с.
2. Продукция «Термосиб плюс». Кабели для промышленного обогрева // [Электронный ресурс]. – <http://www.termosib.ru/products/teploflex.php>
3. Система – Обогрева ETIREX - CHROMALOX // [Электронный ресурс]. – [http://www.sam.kz/files/downloads/heating/ETIREX\\_CABLE\\_PRESENTATION.pdf](http://www.sam.kz/files/downloads/heating/ETIREX_CABLE_PRESENTATION.pdf)
4. Фонарев З.И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности. Л.: Недра, 1984. 148 с.
5. Система кабельного обогрева трубопроводов и резервуаров «Тепломаг» // [Электронный ресурс]. – <http://www.teplolux-samara.ru/teplomag.htm>
6. Макулов И.А., Мамаев Н.М., Конесев С.Г. Применение систем средне-частотного индукционного нагрева при транспортировке нефтепродукта // Нефтегазовое дело [Электронный ресурс]. Электрон. журн. 2008., №2. <http://www.ngdelo.ru/2008/2/75-79.pdf>
7. Теплолокс-сервис. Саморегулирующаяся нагревательная лента ФСУ / FSU // [Электронный ресурс]. – <http://www.prom-obogrev.ru/katalog-produkcii/nagrevatelnye-kabeli/samoregulirujushhijjsja-kabel/samoreg-kabel-fsu.html>
8. Конесев С.Г., Хлюпин П.А. Математическая модель тепловых режимов изотермических трубопроводов. // Вести ВУЗОВ Черноземья. 2008. №3. С. 46-47.

*Конесев С.Г., канд.техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ*

*S.G. Konesev, cand.tech.sci., associate professor of chair « Electrical Engineering and Electrical Industries», FSBEI USPTU*

*Хлюпин П.А., ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ*

*P.A. Khlupin, assistant of chair «Electrical Engineering and Electrical Industries», FSBEI USPTU*

*e-mail: konesevSG@yandex.ru*