

## Краткие сообщения

УДК 621.365.5

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ\*

*Л.С. Зимин, А.С. Леоненко*

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

**Аннотация.** Рассматриваются специфические особенности индукционного нагрева, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации индукционных нагревательных установок (ИНУ). Подчеркивается определяющая роль конфигурации температурного поля для достижения необходимого качества нагрева. В данном случае для индукционного нагрева является характерным наличие краевых эффектов – как продольных, так и поперечных. Причем первые присутствуют при нагреве как цилиндрических, так и прямоугольных заготовок. Степень проявления поперечного краевого эффекта зависит от электрических и теплофизических свойств нагреваемого металла, размеров поперечного сечения, частоты тока индуктора и величины тепловых потерь. Электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл» прямоугольной формы характеризуются электродинамическими усилиями и связанными с ними вибрациями и шумом.

**Ключевые слова:** индуктор, деформация, нагрев, электродинамические силы, вибрация, шум.

Индукционный нагрев широко представлен в промышленных технологиях, причем как в специфическом качестве, например в сварочных производствах [1], так и в основном предназначении – нагрев металла под деформацию.

В настоящее время наблюдается тенденция роста объема индукционных нагревательных установок (ИНУ) в кузнечном, прокатном и прессовом производствах. На долю индукционного нагрева [2] приходится около 70 % всей мощности, идущей на нагрев перед операциями пластической деформации. В условиях дефицита электроэнергии и ее высокой стоимости актуальное значение приобретает проблема достижения экстремальных значений технико-экономических показателей технологических комплексов «индукционный нагрев – обработка металла давлением». Здесь решающее значение приобретает конфигурация температурного поля, от которого зависят пластичность деформируемого металла и, соответственно, производительность процесса деформации и качество готового полуфабриката.

---

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-08-0305).*

*Зимин Лев Сергеевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Леоненко Александра Сергеевна (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

При индукционном нагреве качество температурного поля по длине индуктора [3] в основном определяется продольным краевым эффектом, отстроиться от которого можно при помощи выбора оптимальной величины заглубления выходного торца нагреваемой заготовки.

В настоящее время нет решения задачи о выделении мощности на торцах за счет деформации магнитного поля индуктора на концах. Не существует даже постановки такой задачи.

Приведем следующие физические рассуждения. Используя вполне приемлемую аналогию с полем потока невязкой жидкости, можно представить, что электромагнитное поле омывает заготовку подобно водяному потоку, омывающему пористый камень. При малых размерах пор (глубины проникновения) можно смело пренебречь тем количеством воды, которое в них просачивается, и при расчете обтекания не принимать эти поры во внимание. При течении жидкости по каналам с резким изменением (под прямым углом) сечения течение на большом расстоянии от места изгиба можно считать однородным, причем скорость течения (напряженность магнитного поля) обратно пропорциональна ширине канала (поперечные размеры заготовки и индуктора). Стенки канала являются линиями потока. Ясно, что в зоне угла скорость будет сначала возрастать до вершины угла (теоретически до бесконечности), а затем снова убывать до нового установившегося значения, определяемого шириной канала.

При аналогии с магнитоэлектростатической задачей можно предположить, что объем заготовки заполнен неким гипотетическим материалом, сквозь который не проникают линии магнитного поля. При этом индуктор и заготовку можно представить в виде тонких широких токонесущих лент. Тогда для плоскопараллельного поля между лентами может быть применен в полной мере аппарат конформных отображений [4]. Поле двух лент, несущих разнонаправленные токи, подобно полю плоского конденсатора. Если на силовых участках, обращенных к заготовке и краю индуктора, плотность линии представить эквипотенциалами, то можно считать, что максимальная величина настилов тока в индукторе и заготовке будет на краях пластин, т. е. на краях заготовки.

При этом, хотя по всем виткам индуктора протекает один и тот же ток, в крайних витках плотность тока возрастает, а с обратной стороны она падает и может даже принять отрицательное значение. Физически объяснить повышение настила тока на краях заготовки можно следующим путем.

Нити тока на боковой поверхности заготовки стараются взаимно оттолкнуться и одновременно притянуться к нитям тока в индукторе. При этом вихревые токи на краю будут испытывать с одной стороны отталкивание от соседних вихревых нитей, а с другой – притяжение не только по нормальному к заготовке направлению, но также в сторону выступающего края индуктора. Эти силы действуют согласно и способствуют вытеснению тока на край заготовки. Даже когда край индуктора не выступает за заготовку, вытеснение тока все равно будет за счет отталкивания от токов средней части и отсутствия уравнивания со стороны края. С другой стороны, исходя из закона – ток стремится выбрать путь с минимальным полным сопротивлением – можно заключить, что настил на краях будет выше, ведь магнитный поток будет в какой-то степени «срезать» угол, вытесняя туда ток, т. к. там он будет охвачен минимальным из возможных по всей длине индуктора магнитным потоком.

Одновременно с продольными краевыми эффектами в ИНУ, предназначенных для нагрева тел прямоугольной формы, например слябов под прокатку, воз-

никают поперечные [5, 6, 7] краевые эффекты. Они характеризуются неравномерностью температурного поля по периметру поперечного сечения нагреваемой заготовки, когда угловые зоны имеют положительный или отрицательный градиент температуры по сравнению с гранями. Знак градиента и его величина определяются материалом нагреваемой заготовки, соотношением размеров ее поперечного сечения и частотой тока индуктора.

В случае индукционного нагрева тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся слябы, возникает проблема, которая определяется тем, что электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл» характеризуются не только выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе, – в этом случае необходимо учитывать также объемную плотность электромагнитного поля и связанные с ней электродинамические усилия [8,9]. Особенно остро эта проблема проявляется при индукционном нагреве прямоугольных заготовок, особенно из немагнитных металлов [10]. Авторами разработаны методы расчета электродинамических и виброакустических характеристик индукторов для нагрева прямоугольных заготовок, которые можно использовать уже на стадии проектирования.

Основным фактором, препятствующим широкому внедрению мощных индукционных установок для нагрева тел прямоугольной формы, например слябов, является сильная вибрация обмотки индуктора, которая сопровождается шумом, превышающим санитарные нормы, и может привести к разрушению установки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Зимин Л.С. Индукционная система для подогрева труб перед сваркой // Электротехника. – 2018. – № 3. – С. 40–45.
2. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Ключевые проблемы при эксплуатации индукционных нагревателей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 1 (53). – С. 179–182.
3. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Особенности индукционного нагрева под деформацию // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 128–135.
4. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Аналитические исследования при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1 (23). – С. 152–159.
5. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7 (28). – С. 231–233.
6. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Проектирование прямоугольных индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 3 (51). – С. 151–154.
7. Егиазарян А.С. Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1 (45). – С. 194–198.
8. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Электродинамические процессы при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 1 (49). – С. 156–160.
9. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Виброзащита мощных индукторов // Вестник Самарского государственного архитектурно-строительного университета. Градостроительство и архитектура. – 2016. – № 3 (24). – С. 135–139.
10. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 2 (50). – С. 203–208.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2018 г.

## ELECTROMAGNETIC AND THERMAL EFFECTS INDUCTION HEATING

*L.S. Zimin, A.S. Leonenko*

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

**Abstract.** *Specific features of induction heating are considered, which must be taken into account when designing and operating INU. The decisive role of the configuration of the temperature field is emphasized to achieve the required heating quality. In this case, the presence of edge effects, both longitudinal and transverse, is characteristic for inductive heating. Moreover, the former are present when both cylindrical and rectangular preforms are heated. The degree of manifestation of the transverse edge effect depends on the electrical and thermal properties of the heated metal, the dimensions of the cross section, the frequency of the inductor current and the magnitude of the heat losses. Electromagnetic processes in the "inductor-metal" system of a rectangular shape are characterized by electrodynamic forces and associated vibrations and noise.*

**Keywords:** *inductor, deformation, heating, electrodynamic forces, vibration, noise.*

---

*Lev S. Zimin (Dr. Sci.(Techn.)), Professor.  
Aleksandra S. Leonenko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 620.193

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЮЩИХ КЛАПАНОВ В ПРОГРАММНОМ ПРОДУКТЕ «МИР ПИА»

**С.Б. Кобыгин**

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

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы интеграции регулирующих клапанов в модели технологических установок нефтегазовых производств, разрабатываемые в программном продукте «Мир ПИА». В качестве примера показано создание модели фрагмента установки, состоящего из трубопровода с регулирующим клапаном. Представлена настройка последовательности расчета технологической схемы. Приведены результаты гидравлического расчета для двух случаев. Показано, что в первом случае установка может работать в нормальном режиме, а во втором не справляется с заданной производительностью. Внедрение таких моделей позволит производственному персоналу оперативно решать ряд проблем, таких как оценка возможности работы установки при использовании другого сырья или другой производительности, выявление причин несоответствия продукции нормативным требованиям и т. д.*

***Ключевые слова:** моделирование технологических процессов, регулирующий клапан, гидравлический расчет.*

В настоящее время актуальным направлением является создание математических моделей действующих технологических установок нефтегазовой и химической промышленности [1]. Их внедрение позволит производственному персоналу оперативно решать ряд проблем, таких как оценка возможности работы установки при использовании другого сырья или другой производительности, выявление причин несоответствия продукции нормативным требованиям и т. д. Для этого возможно использование современных программных продуктов, к числу которых может быть отнесена программная платформа «Мир ПИА» [2, 3].

Одной из проблем при разработке такого рода моделей является интеграция в них элементов автоматизации технологического процесса [4, 5]. В рамках настоящей статьи продемонстрирована интеграция регулирующего клапана в математическую модель, созданную с помощью платформы «Мир ПИА» [2]. Для простоты рассмотрения выбран простой фрагмент установки, приведенный на рис. 1. Здесь поток жидкости движется по трубопроводу из емкости S1 с высоким давлением в емкость S2 с низким давлением, проходя при этом аппарат воздушного охлаждения T1. Расход жидкости регулируется клапаном F1.

Включение в модель установки элементов автоматизации стало возможным после существенной переработки модуля решения технологической схемы в целом. Центральным моментом данной модернизации стала возможность включения аппаратов в циклы с прямым (значения давления вычисляются от начала к концу цикла) и обратным (значения давления вычисляются от конца к началу цикла) направлениями гидравлического расчета.

---

*Кобыгин Сергей Борисович (д.т.н., доцент), заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».*

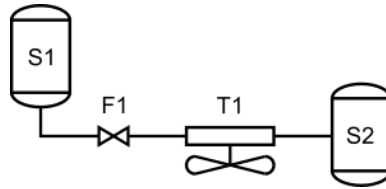


Рис. 1. Моделируемый фрагмент технологической установки

Созданная математическая модель данного участка представлена на рис. 2.

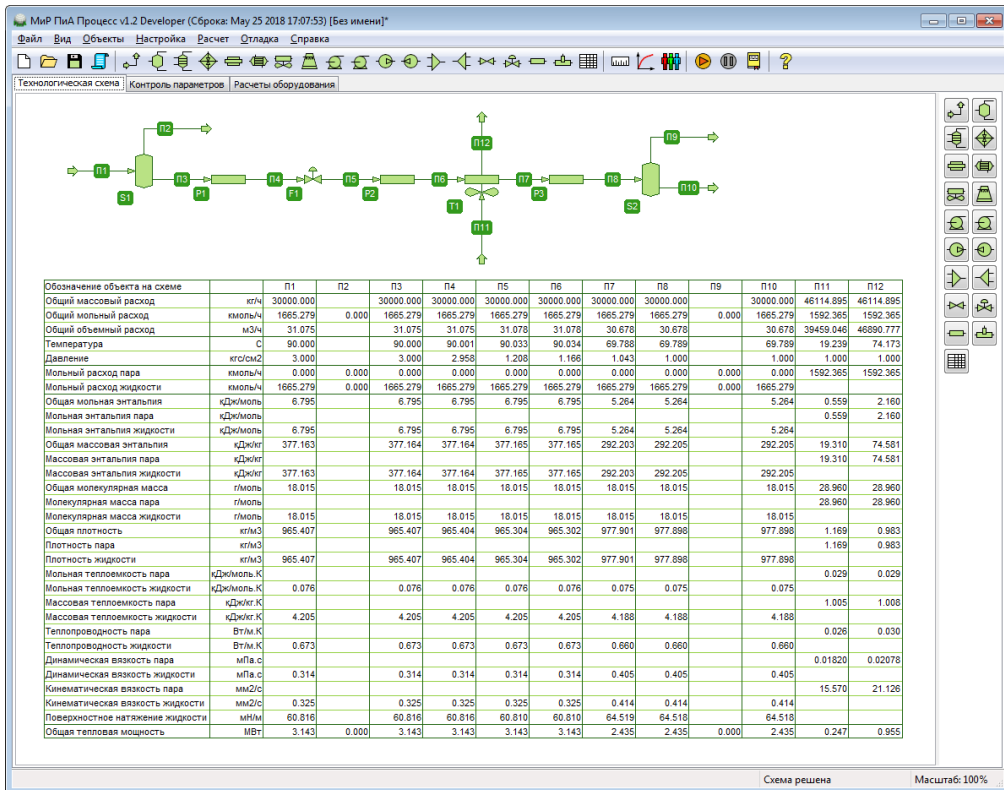


Рис. 2. Модель фрагмента технологической установки, созданная в программном продукте «Мир ПиА»

Настройка направления гидравлического расчета производится в диалоговом окне (рис. 3). Из рисунка видно, что емкость S1 и трубопровод P1 рассчитываются в прямом, а остальные объекты – в обратном направлении. Причем важно, чтобы в цикле обратного гидравлического расчета первым стоял регулирующий элемент F1, а последним – элемент с фиксированным давлением S2. При такой организации процесса моделирования на каждой итерации замыкающий последовательность гидравлического расчета клапан пытается найти такое положение затвора, которое создает требуемый перепад давления (рис. 4).

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты расчета фрагмента установки при расходе протекающей по нему жидкости 30 т/ч. Перепады давления на отметках 50 и 100 м представляют собой гидравлические сопротивления регулирующего клапана и аппарата воздушного охлаждения соответственно. По-

ложение рабочей точки клапана (см. рис. 4) показывает, что работа при заданной производительности возможна.

Последовательность и точность расчета

|    | Циклы и аппараты  | Количество итераций | Погрешность расхода | Погрешность температуры | Погрешность давления |
|----|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| 1  | Начало цикла (>>) | 50                  | 0.0001              | 0.01                    | 0.01                 |
| 2  | S1                | 50                  | 1                   | 1                       | 1                    |
| 3  | P1                | 50                  | 1                   | 1                       | 1                    |
| 4  | Начало цикла (<<) | 50                  | 0.0001              | 0.01                    | 0.01                 |
| 5  | F1                | 50                  | 1                   | 1                       | 1                    |
| 6  | P2                | 50                  | 1                   | 1                       | 1                    |
| 7  | T1                | 50                  | 1                   | 1                       | 1                    |
| 8  | P3                | 50                  | 1                   | 1                       | 1                    |
| 9  | S2                | 50                  | 1                   | 1                       | 1                    |
| 10 | Конец цикла       |                     |                     |                         |                      |
| 11 | Конец цикла       |                     |                     |                         |                      |

Примечание: погрешности расхода и температуры для циклов измеряются в долях расхода и кельвинах соответственно, а погрешности для аппаратов измеряются в долях от соответствующих погрешностей циклов.

OK Отмена

Рис. 3. Диалоговое окно для настройки последовательности и точности расчета



Рис. 4. Диалоговое окно с результатами расчета регулирующего клапана

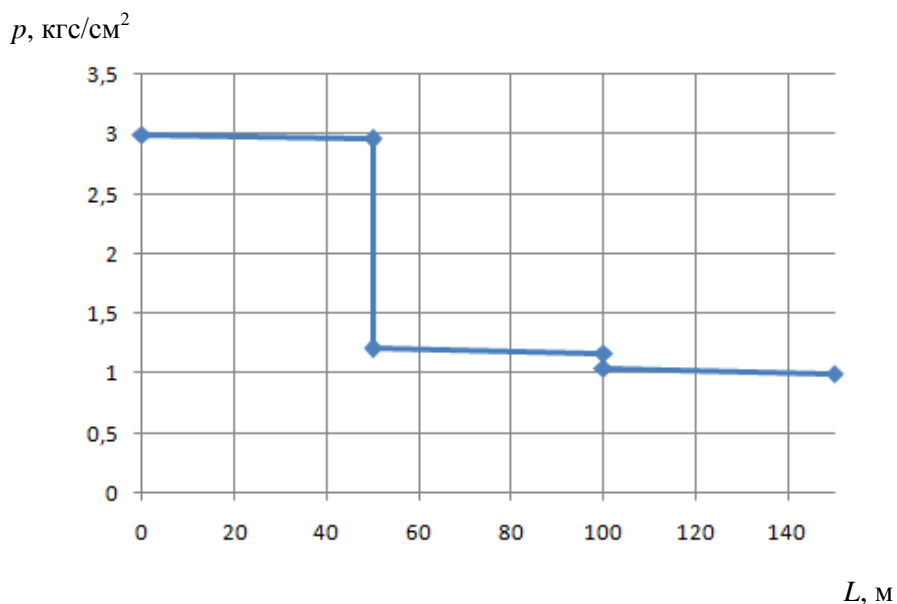


Рис. 5. Профиль давления при расходе жидкости 30 т/ч

В качестве другого примера рассмотрим работу данной линии при расходе жидкости 100 т/ч. Полученные результаты моделирования приведены на рис. 6. Видно, что гидравлические сопротивления элементов схемы существенно увеличились, что привело к отрицательному расчетному перепаду давления на клапане. Из этого следует вывод о невозможности работы линии при данном расходе жидкости.

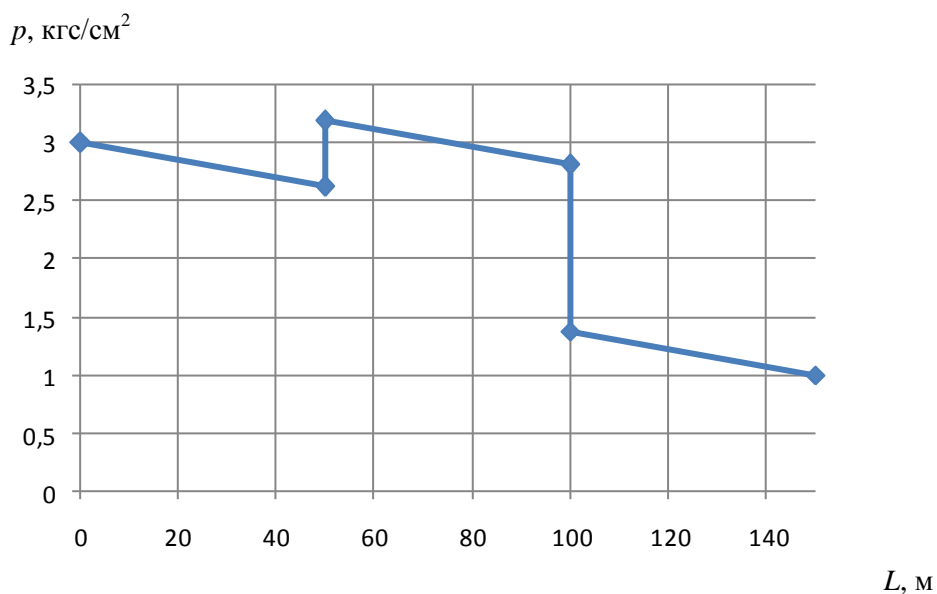


Рис. 6. Профиль давления при расходе жидкости 100 т/ч

Все сказанное позволяет сделать вывод о возможности построения математических моделей действующих технологических установок, имеющих в своем составе элементы автоматизации, в программном продукте «МиР ПиА».



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иваняков С.В., Крючков Д.А.* Применение программного продукта «МиР ПиА» для компьютерного моделирования систем сепарации нефти // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 1 (57). – С. 168–172.
2. *Коныгин С.Б., Крючков Д.А.* Моделирование и расчет процессов и аппаратов (МиР ПиА). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613176.
3. *Ghasem N.* Computer Methods in Chemical Engineering // Taylor & Francis Group, LLC. 2012. – 492 p.
4. *Маршалов Е.Д., Нечаева О.А.* Имитационное моделирование гидравлических систем с регулирующими органами // Вестник ИГЭУ, 2007. – № 4. – С. 84–87.
5. *Капранова А.Б., Лебедев А.Е., Мельцер А.М., Солопов С.А., Неклюдов С.В.* О методах расчета гидравлического сопротивления регулирующих органов при транспортировании однокомпонентных сред // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4 (ч. 1). – С. 52–60.

*Статья поступила в редакцию 2 февраля 2018 года*

## CONTROL VALVES MODELLING USING THE MIR PIA SOFTWARE

***S.B. Konygin***

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

***Abstract.*** *This paper is about the integration of the control valves in the gas and oil plant models that can be created by MiR PiA software. As example, a model of the simple part of the plant is shown. This model contains the pipeline with the control valve. A configuration of the calculation sequence is shown. A hydraulics calculation results are described for two cases. In the first case hydraulic line can work in the normal mode. In the second case the pressure drop is too big. An adoption of these models can help staff solve several problems, such as different raw material using, productivity increase, assurance of product quality problems, etc.*

***Keywords:*** *modeling of technological processes, control valve, hydraulic calculation.*

---

*Sergey B. Konygin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

УДК 622.24:681.14

## **АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕСА БУРИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА И ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ НА ДОЛОТО**

***В.А. Кузнецов, А.В. Прилепин***

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

***Аннотация.** Рассмотрены алгоритмические методы повышения точности измерения веса бурильного инструмента и осевой нагрузки на долото. Показано, что существующие методы измерения этих параметров обладают большими погрешностями измерения, связанными с наличием сил трения в скважине и в талевого системе буровой установки. За счет проведения дополнительных измерений специально сформированных мер, однородных с измеряемыми величинами, удастся скорректировать погрешности измерения. Задачи коррекции погрешностей алгоритмическими методами решаются с помощью микропроцессорной техники.*

***Ключевые слова:** вес бурильного инструмента, осевая нагрузка на долото, методы повышения точности измерения, алгоритмы обработки измерительной информации.*

Вес бурильного инструмента и осевая нагрузка на долото относятся к важнейшим параметрам процесса бурения, во многом определяющим эффективность выполнения технологических операций. Однако используемые в настоящее время гидравлические индикаторы веса (ГИВ) и разработанный НПП «Петролайн-А» контрольно-измерительный комплекс ДЭЛ-140 имеют невысокую точность измерения веса бурильного инструмента, которая к тому же сильно зависит от окружающей температуры, а при смене талевого каната требуется индивидуальная градуировка измерительного устройства. Даже межгосударственный стандарт «Система наземного контроля процесса бурения нефтяных и газовых скважин» (ГОСТ 14169-93) допускает предельную погрешность измерения нагрузки на крюке до  $\pm 11,5\%$  [3].

Невысокая точность измерения веса бурильного инструмента и осевой нагрузки на долото снижает эффективность оптимизации режимов процесса бурения, определения места прихвата бурильного инструмента, автоматизации измерения длины бурильной колонны и глубины скважины.

Появление микропроцессоров, непосредственно встраиваемых в измерительные устройства, позволило по-новому решить задачи повышения точности измерения. Эффективными в этом случае являются алгоритмические методы повышения точности измерения, основанные на получении дополнительной измерительной информации и специальных алгоритмах обработки этой информации [1].

В большинстве случаев вес бурильного инструмента определяется по натя-

---

*Кузнецов Владимир Андреевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».*

*Прилепин Артем Валентинович, магистрант.*

жению неподвижного конца талевого каната с помощью гидравлических или электрических измерительных преобразователей. Математическую модель измерительной цепи можно представить выражением

$$N = \frac{K_H}{K_O} (Q \pm T_k \pm T_T) \pm \alpha ,$$

где  $N$  – результат измерения или кодовый сигнал на выходе измерительного преобразователя;

$K_H$  – коэффициент преобразования всей измерительной цепи;

$K_O$  – коэффициент оснастки талевой системы;

$Q$  – вес бурильного инструмента;

$T_k$  – силы трения колонны о стенки скважины;

$T_c$  – силы трения в талевой системе;

$\alpha$  – аддитивная помеха в виде внешних воздействий.

Аддитивной помехой могут быть электромагнитные наводки, возникающие в соединительном кабеле, и дрейф нуля электронных усилителей.

Погрешность измерения веса бурильного инструмента возникает из-за нестабильности коэффициента преобразования измерительной цепи  $K_H$ , действия сил трения  $T_k$  и  $T_c$ , знак которых зависит от направления движения бурильной колонны, и действия аддитивной помехи, включающей в себя нестабильность температуры, параметров талевого каната и электромагнитной наводки.

Из алгоритмических методов повышения точности измерения наиболее эффективными и легко реализуемыми являются метод образцовых мер и тестовые методы.

Метод образцовых мер заключается в проведении дополнительных измерений, при которых на вход измерительного устройства подается образцовая мера, однородная с измеряемой величиной. При измерении веса бурильного инструмента удобно в качестве одной образцовой меры использовать «нулевой вес», например во время «холостых рейсов» талевой системы, когда талевый блок не нагружен. В качестве второй меры используется вес турбобура или вес первой «свечи», которая составлена из утяжеленных бурильных труб, взвешенных заранее с помощью динамометра.

Операции подключения ко входу измерительного устройства образцовых мер выполняются один раз после смены талевого каната.

Алгоритмический метод повышения точности измерения веса бурильного инструмента заключается в следующем.

Первое измерение проводится при ненагруженном талевом блоке ( $Q = 0$ ,  $T_k = 0$ ). Чтобы силы трения были одного знака, измерения выполняются при одном и том же направлении движения талевого блока.

Код результата первого измерения представлен выражением

$$N_1 = \frac{K_H}{K_O} T_T + \alpha .$$

Вторые измерения выполняются при спуске первой свечи или турбобура, вес которых был определен заранее (значение этого веса вносится в память микроконтроллера):

$$N_2 = \frac{K_H}{K_O} (Q_O + T_T) + \alpha ,$$

где  $Q_o$  – образцовый вес.

Значения  $N_1$  и  $N_2$  вводятся в память микроконтроллера.

При необходимости определения веса бурильного инструмента выполняется третье измерение при полностью погруженном талевом блоке:

$$N_3 = \frac{K_H}{K_o} (Q + T_k + T_T) + \alpha.$$

Значения трех измерений  $N_1$ ,  $N_2$  и  $N_3$  обрабатываются микропроцессором по алгоритму

$$N_2 - N_1 = \frac{K_H}{K_o} Q_o,$$

отсюда

$$K_H = \frac{K_o (N_2 - N_1)}{Q_o}; \quad (1)$$

$$N_3 - N_1 = \frac{K_H}{K_o} (Q + T_k).$$

С учетом (1) получим

$$N_3 - N_1 = \frac{N_2 - N_1}{Q_o} (Q + T_k).$$

Из этого выражения находится значение веса бурильного инструмента:

$$Q = \frac{N_3 - N_1}{N_2 - N_1} Q_o + T_k. \quad (2)$$

Измерительное устройство, работающее по алгоритму (2), не требует предварительной калибровки измерительной цепи. Единица измерения веса задается мерой  $Q_o$ , значение которой заносится в память микроконтроллера.

Результат измерения веса бурильного инструмента не зависит от коэффициента преобразования измерительной цепи  $K_H$ , силы трения в талевой системе  $T_C$ , аддитивной помехи  $\alpha$ . Остался один источник погрешности измерения – сила трения колонны о стенки скважины  $T_k$ .

Для уменьшения действия этой силы в упомянутом ранее ГОСТ 14169-93 рекомендуется в процессе измерения медленно проворачивать колонну бурильных труб.

Возможен другой способ уменьшения действия этой силы. В [2] рекомендуется проводить измерение веса при двух направлениях движения бурильной колонны, при которых сила трения войдет в результат измерения с разными знаками. Среднее арифметическое значение этих двух измерений позволяет значительно снизить погрешность из-за трения колонны о стенки скважины.

Осевая нагрузка на долото создается частью веса колонны бурильных труб и определяется как разность начального веса бурильного инструмента  $Q_H$  до начала бурения, когда долото не касается забоя скважины, и веса бурильного инструмента  $Q_i$  в процессе бурения:

$$P = Q_H - Q_t.$$

Для определения осевой нагрузки на долото проводятся еще два измерения. Результат измерения до начала бурения

$$N_4 = \frac{K_H}{K_O} (Q_H - T_k - T_T) + \alpha.$$

Код результата измерения в процессе бурения

$$N_5 = \frac{K_H}{K_O} (Q_t - T_k - T_T) + \alpha.$$

Интервалы измерения выбираются с учетом скорости изменения осевой нагрузки на долото. Она обычно мала и не приводит к динамическим погрешностям измерения.

Обработка измерительной информации ведется по алгоритму

$$N_4 - N_5 = \frac{K_H}{K_O} (Q_H - Q_t) = \frac{K_H}{K_O} P.$$

С учетом (1) получим

$$P = \frac{N_4 - N_5}{N_2 - N_1} Q_O. \quad (3)$$

Измерения осевой нагрузки на долото по алгоритму (3) позволяют полностью исключить все перечисленные выше погрешности измерения.

Погрешность измерения осевой нагрузки на долото определяется точностью задания образцовой меры  $Q_O$  и точностью выполнения вычислительных операций.

Как и при измерении веса бурильного инструмента, при измерении осевой нагрузки на долото не требуется предварительная калибровка измерительного устройства. Калибровка проводится автоматически при введении в память микроконтроллера значения меры  $Q_O$ .

Измерения веса бурильного инструмента  $N_5$  проводятся в процессе бурения дискретно через определенные интервалы времени. Период дискретизации определяется по динамическим характеристикам осевой нагрузки на долото.

Осевая нагрузка на долото может быть измерена с помощью косвенной меры.

Если верхний конец бурильной колонны опустить на величину  $\Delta l$ , то на основании закона Гука осевая нагрузка возрастет на величину

$$\Delta P = \frac{EF}{L} \Delta l,$$

где  $E$  – модуль упругости материала труб;  
 $F$  – площадь поперечного сечения труб;  
 $L$  – длина колонны бурильных труб.

Алгоритм коррекции погрешностей заключается в следующем.

Код первого измерения определяется выражением

$$N_1 = \frac{K_H}{K_O} (Q_H - T_k - T_T) + \alpha .$$

В процессе бурения устанавливается осевая нагрузка на долото  $P_1$ , несколько меньшая заданного значения, и проводится второе измерение:

$$N_2 = \frac{K_H}{K_O} (Q_H - P_1 - T_k - T_T) + \alpha .$$

Затем осевая нагрузка доводится до заданного значения  $P$ , проводится третье измерение веса и одновременно измерение перемещения верхнего конца буровой колонны  $\Delta l$ :

$$N_3 = \frac{K_H}{K_O} (Q_H - P - T_k - T_T) + \alpha .$$

Полученная система этих трех уравнений решается относительно  $P$ :

$$P = \frac{N_1 - N_3}{N_2 - N_3} \Delta P = \frac{N_1 - N_3}{N_2 - N_3} \frac{EF}{L} \Delta l . \quad (4)$$

Точность косвенного измерения осевой нагрузки на долото по алгоритму (4) зависит от точности измерения перемещения верхнего конца буровой колонны  $\Delta l$ , точности задания параметров колонны  $E$ ,  $F$ ,  $L$  и точности вычислительных операций.

Рассмотренные алгоритмические методы повышения точности измерений позволяют, используя существующие гидравлические и электрические измерительные преобразователи веса бурового инструмента, не отличающиеся высокой точностью, повысить точность измерения за счет проведения дополнительных измерений и обработки измерительной информации по специальным алгоритмам. Современная микропроцессорная техника позволяет решать эти задачи с высокой эффективностью.

Погрешность косвенных измерений определяется точностью выполнения вычислительных операций и числом разрядов аналого-цифровых преобразователей. Современная измерительная аппаратура имеет высокие метрологические характеристики, поэтому влияние их на погрешность косвенных измерений не учитывается.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов В.А. Методы повышения помехоустойчивости и точности средств измерений: учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 68 с.
2. Александров М.М. Взаимодействие колонн труб со стенками скважины. – М.: Недра, 1982. – 144 с.
3. Алиев Т.М. и др. Информационные системы в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1972. – 240 с.

*Статья поступила в редакцию 22 февраля 2018 г.*

## ALGORITHMIC METHODS FOR IMPROVING ACCURACY OF DRILLING INSTRUMENT WEIGHT AND AXIAL LOAD ON BIT

*V.A. Kuznetsov, A.V. Prilepin*

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

***Abstract.** Algorithmic methods for improving accuracy of drilling instrument weight and axial load on bit were considered in this article. Existing measuring methods have bigger inaccuracy because of friction forces in well and drilling line system. Inaccuracies of measurements are adjusted by additional measurements of specially formed measures as uniform as measuring quantities. The problems of adjustment of inaccuracies are solved by microprocessor.*

***Keyword:** drilling instrument weight, axial load on bit, methods for improving accuracy, algorithms for processing measurement information.*

---

*Vladimir A. Kuznetsov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Artem V. Prilepin, Graduate Student.*

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 10 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке будут рассматриваться материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

**Требования к оформлению статей находятся на сайте университета**

**<http://vestnik-teh.samgtu.ru>**

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

***Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.***

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: [vest\\_teh@samgtu.ru](mailto:vest_teh@samgtu.ru)

Редколлегия журнала