

УДК 665.7.032.5

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЩЕННОГО  
ПРОЦЕССА СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ БУРОГО УГЛЯ  
НА ВОЗДУШНОМ И КИСЛОРОДНОМ ДУТЬЕ****И.О. Михалев, С.Р. Исламов**

Выполнено экспериментальное исследование обращенного процесса слоевой газификации бурого угля на воздушном и кислородном дутье. Определены целевые режимы использования данного технологического процесса на воздушном дутье. Установлено существенное ускорение процесса газификации при переходе к кислородному дутью. Сформулированы способы интенсификации обращенного процесса газификации в зависимости от конкретной цели его применения.

**Ключевые слова:** уголь, обращенное дутье, слоевая газификация, интенсификация.

**Введение**

Обращенный процесс слоевой газификации угля (спутная подача топлива и окислителя) [1] имеет несколько принципиально важных отличий от широко известного классического способа со встречной подачей топлива и окислительного дутья. Во-первых, получаемый газ не содержит продуктов пиролиза, во-вторых, при определенных режимах можно производить частичную газификацию угля, т.е. его карбонизацию. В настоящее время эти особенности представляют значительный практический интерес в применении к переработке дешевых марок углей как с целью получения генераторного газа, не забалластированного смолами, так и с целью получения заменителя определенных марок классического кокса. Однако обращенный процесс имеет сравнительно низкую производительность. По этой причине в прошлом веке в период наиболее активного использования процессов газификации угля данная технология выбыла из конкурентной борьбы, что, в свою очередь, обусловило резкое снижение исследовательского интереса к этой теме и отсутствие достаточно подробных экспериментальных данных на сегодняшний день. Так, в работах [2, 3] частичная газификация угля практически не рассматривается. Автор [2] при аналогичной рассматриваемой в настоящей статье схеме организации процесса взаимодействия топлива с окислителем исследует технологию сжигания твердого топлива. В литературе, где подробно изучается газификация угля [3–5], обращенный процесс рассматривается только на качественном уровне; основное внимание, как правило, уделяется прямому процессу газификации. В этой связи необходимо отметить практически полное отсутствие количественных данных о процессе газификации с обращенным дутьем для различных видов угля. Тем более отсутствуют данные о влиянии состава подаваемого дутья на характеристики процесса газификации.

В условиях современной рыночной конъюнктуры отношение к обращенному процессу газификации угля, также известному в настоящее время как процесс «ТЕРМОКОКС-С», радикально изменилось [6]. Это вызывает необходимость детального исследования ее закономерностей как с целью непосредственного применения в промышленности, так и с целью поиска путей интенсификации технологического процесса.

**Экспериментальный стенд и методика проведения экспериментов**

Газификатор представляет собой вертикальный реактор шахтного типа периодического или непрерывного действия. В настоящем исследовании использован реактор

периодического действия диаметром 300 мм со стационарным слоем дробленого угля, в котором зажигание слоя осуществляется сверху, подача воздуха – снизу. При определенных условиях, спустя некоторое время после зажигания, в верхней части слоя формируется тепловая волна<sup>1</sup>, которая затем перемещается навстречу дутью примерно с постоянной скоростью. Для измерения температуры слоя угля внутри засыпки равномерно с шагом 180 см стационарно размещены 7 защищенных ХА термопар с диаметром термочувствительного элемента 5,3 мм. Непрерывный анализ продуктового газа выполнялся с помощью газоанализатора «ГАММА-100».

В исследовании использован бурый уголь разреза «Бородинский» (марка 2Б) – наиболее перспективное сырье для обращенного процесса газификации. Характеристики угля, использованного в исследовании, приведены в таблице. Для оценки влияния фракционного состава угля и расхода воздуха на характеристики процесса газификации использованы узкие фракции 1–3, 3–5 и 5–8 мм (в дальнейшем просто «фракции»), а также широкая фракция 3–10 мм с равномерным распределением размеров частиц (далее для краткости – «полифракция»). Размеры частиц выбраны из соображений минимизации их термического сопротивления с целью обеспечения максимальной скорости переработки угля. Исследованный диапазон расходов воздуха охватывает область режимов от частичной карбонизации до полной газификации угля: 0,015–0,125 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с). Для изучения влияния расхода кислородного дутья на характеристики процесса использовалась фракция 3–5 мм. В качестве дутья был использован технический кислород. Изученный диапазон расходов кислорода в силу ограничений оборудования несколько уже, чем в случае воздушного дутья: 0,015–0,048 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с).

| $W_t^r$ , % | $A^d$ , % | $V^{daf}$ , % | $C^{daf}$ , % | $O^{daf}$ , % | $H^{daf}$ , % | $N^{daf}$ , % | $S_t^d$ , % | $Q_i^r$ , МДж |
|-------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| 30,0        | 4,9       | 47,5          | 73,8          | 20,43         | 4,8           | 0,78          | 0,18        | 17,7          |

Таблица. Технический и элементный состав угля марки 2Б разреза «Бородинский»

В зависимости от фракционного состава сырья, расхода и типа дутья были получены следующие характеристики процесса газификации:

- скорость перемещения фронта тепловой волны по слою угля;
- скорость потери массы угля;
- удельный выход, химический состав и калорийность получаемого газа;
- выход твердого продукта (в процентах от массы угля) и его калорийность;
- максимальные температуры в тепловой волне.

Особое внимание в исследовании было уделено определению скорости обращенного процесса газификации, представляющей собой количество массы, переходящей из твердой фазы в газ в единицу времени, отнесенное к единице площади сечения реактора. Скорость процесса изменяется во времени при использовании реактора периодического действия, постепенно приближаясь к стационарному значению.

Исходная масса угля в расчетной зоне была известна из начальных условий эксперимента, а масса твердого остатка определялась как произведение массы исходного угля в данной зоне на коэффициент интегрального выхода твердого остатка (доля от массы исходного угля). Скорость газификации, кг/(м<sup>2</sup>·с), рассчитывалась как разность ме-

<sup>1</sup> Тепловая волна, по существу, представляет собой температурную проекцию волны физико-химических превращений, где происходит полное превращение вещества исходного угля в горючий газ и среднетемпературный кокс. Для краткости далее термином «фронт тепловой волны» будем обозначать переднюю границу волны физико-химических превращений.

жду этими массами, отнесенная ко времени прохождения фронтом тепловой волны рассматриваемого участка и к площади сечения реактора.

### Результаты экспериментов

Характер изменения скорости газификации угля и фронта тепловой волны в исследованных режимах приведен на рис. 1. На рис. 2 представлены графики изменения выхода горючего газа и твердого продукта газификации в зависимости от фракции угля и расхода дутья. Для сравнения на графиках приведены соответствующие характеристики для промышленного процесса карбонизации, реализованного на заводе «Карбоника-Ф», г. Красноярск. На заводе используется уголь марки 2Б разреза «Бородинский» фракции 5–15 мм (далее для краткости – «широкая полифракция»).

Данные по скоростям процесса и фронта тепловой волны для кислородного дутья и фракции угля 3–5 мм представлены на рис. 3. На рис. 4 показаны графики соответствующего изменения выхода горючего газа и твердого продукта газификации.

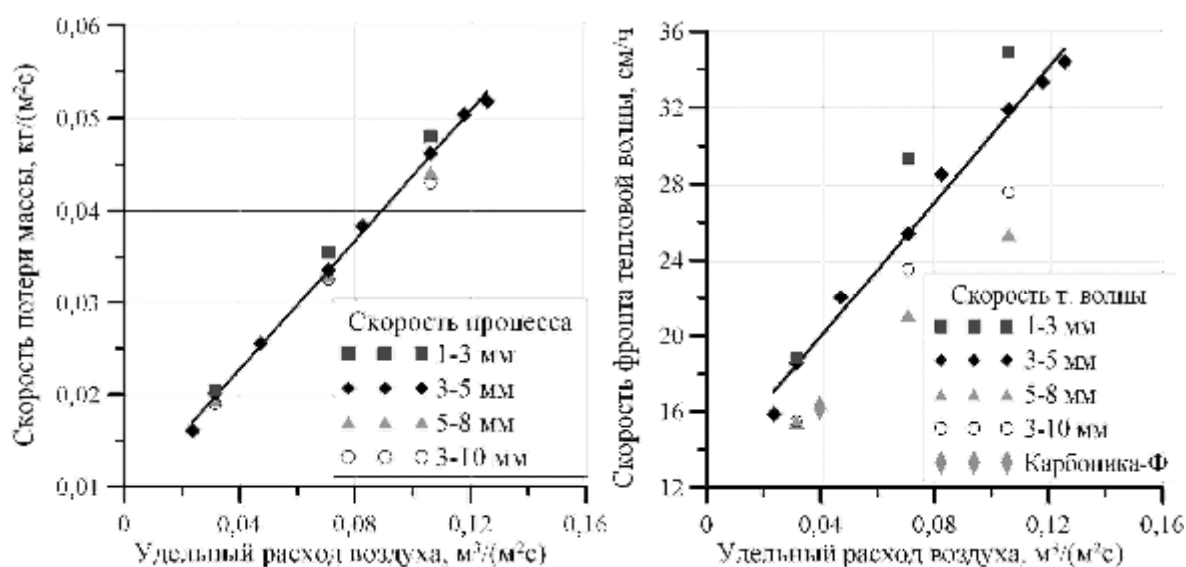


Рис. 1. Скорость процесса и скорость тепловой волны, воздушное дутье

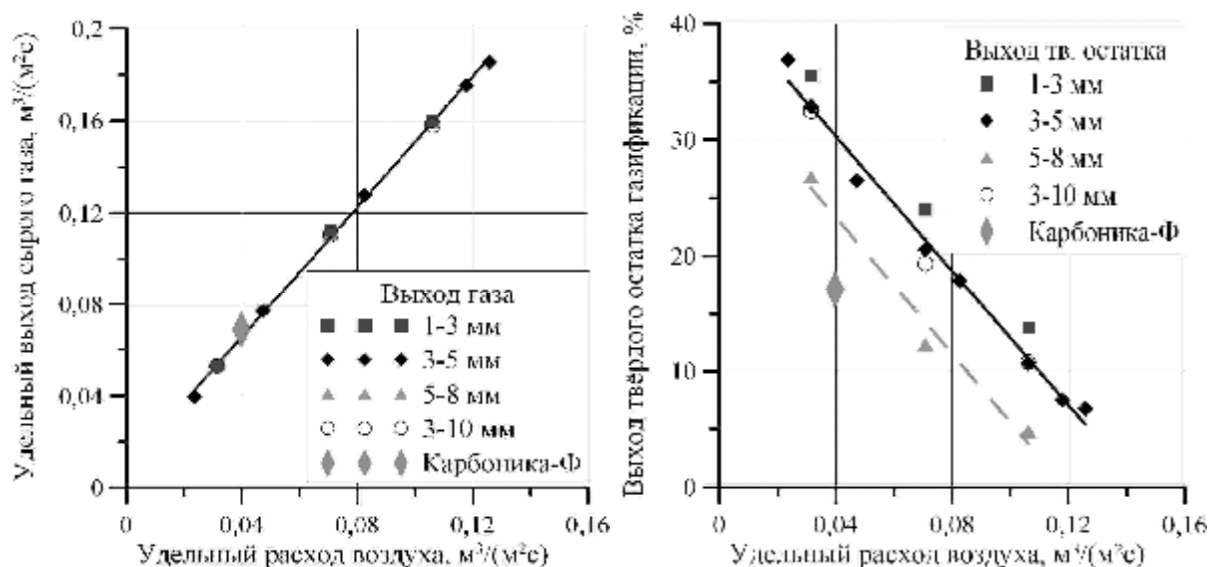


Рис. 2. Производительность реактора по горючему газу и твердому остатку, воздушное дутье

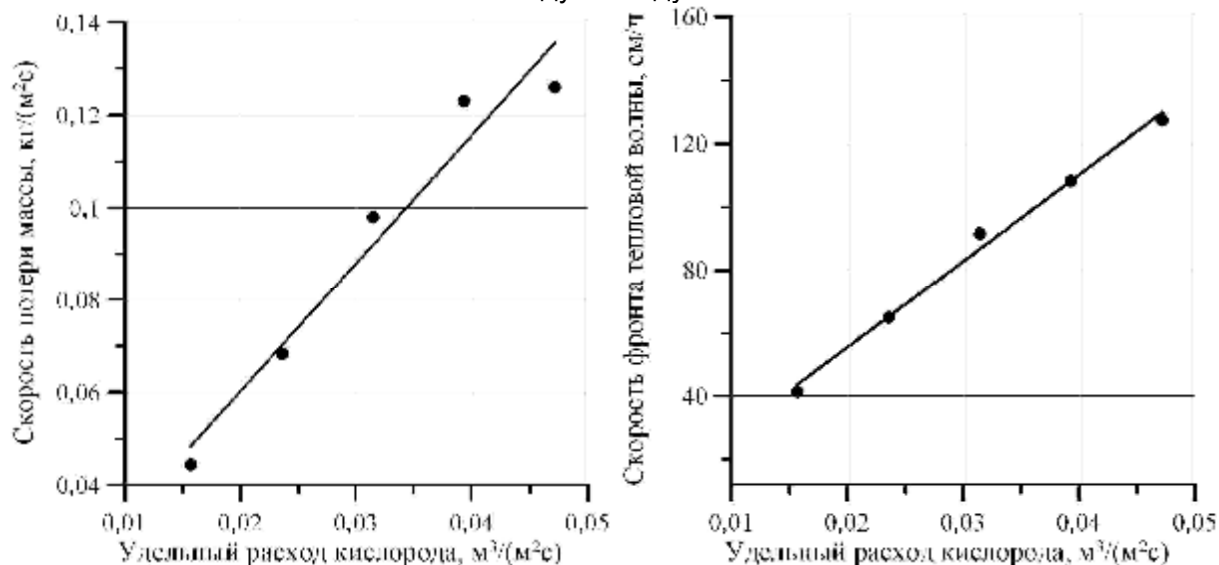


Рис. 3. Скорость процесса и скорость фронта тепловой волны, кислородное дутье

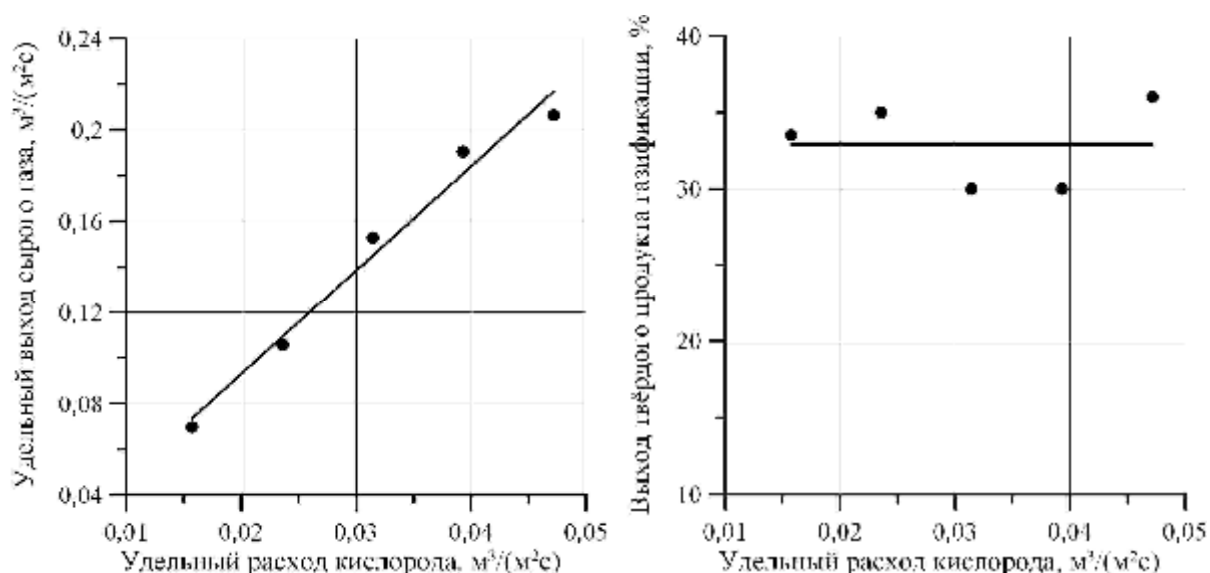


Рис. 4. Производительность реактора по горючему газу и твердому остатку, кислородное дутье

### Обсуждение результатов

Скорость процесса газификации угля линейно возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха (рис. 1). При этом она слабо зависит от фракционного состава сырья: можно видеть, что значения скорости процесса для исследованных фракций во всем диапазоне расходов воздуха практически укладываются в коридор погрешности. Одновременно со скоростью процесса увеличивается и скорость движения фронта тепловой волны. Важно отметить, что скорость волны возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха, а при одинаковом расходе дутья – с уменьшением размера фракции. Это не противоречит слабой зависимости суммарной скорости процесса от фракционного состава сырья: скорость тепловой волны, по сути, определяет пропорцию между масса-

ми газового и твердого продуктов газификации. Чем выше скорость тепловой волны при одном и том же расходе воздуха (чем меньше фракция сырья), тем больше процентный выход твердого продукта. Полифракция в области низких расходов дутья по скорости тепловой волны близка к фракции 5–8 мм, имеющей такой же средний размер частиц (6,5 мм). Однако с увеличением расхода дутья скорость тепловой волны для полифракции все сильнее отклоняется в сторону показателей более мелких фракций. Данные для широкой полифракции свидетельствуют о существовании нижнего предела скорости тепловой волны вблизи значений для фракции 5–8 мм, по крайней мере, в зоне карбонизации: существенное расширение и укрупнение фракции не приводит к дальнейшему уменьшению скорости тепловой волны в связи с этим параметром.

Удельный выход продуктового газа линейно возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха и не зависит от фракционного состава сырья (рис. 2). Калорийность газа в случае мелких фракций и полифракции имеет максимум в области больших расходов воздуха, чем в случае крупной фракции. При этом абсолютное значение максимума для фракции 3–5 мм выше, чем для фракции 5–8 мм. Следовательно, использование мелкой фракции позволяет получить более калорийный газ при большем расходе воздуха, чем в случае крупной фракции, с большей адиабатной температурой сгорания (благодаря повышенной температуре процесса), т.е. интенсифицировать процесс.

Выход твердого продукта газификации тем выше, чем меньше размер фракции (рис. 2). Полифракция по выходу твердого продукта во всем диапазоне расходов ближе к фракциям 1–3 и 3–5 мм. Данные по широкой полифракции дают основание предполагать дальнейшее снижение выхода твердого продукта газификации с увеличением среднего размера частиц угля.

Как видно из рис. 2, при низких значениях расхода дутьевого воздуха (приблизительно  $0,022\text{--}0,047 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ) реализуется режим карбонизации, т.е. неполной газификации исходного угля. Выход твердого остатка в этом случае максимален, максимальна и его калорийность. Очевидно, что указанный диапазон может быть рекомендован для целевого получения среднетемпературного кокса. Горючий газ в этом случае является побочным продуктом.

При больших значениях расхода дутья (приблизительно  $0,100\text{--}0,125 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ) реализуются режимы, близкие к полной газификации исходного угля: достигается максимальный выход горючего газа и максимум его калорийности за счет наибольших концентраций горючих компонентов.

Между этими зонами находится область смешанных режимов, в которых кокс и горючий газ производятся в соизмеримых количествах. Однако и физико-химические характеристики, и удельные выходы обоих продуктов сравнительно невысоки. При увеличении расхода воздуха за пределы зоны полной газификации процесс газификации постепенно трансформируется в процесс горения угля. Эти области режимов не представляют интереса с точки зрения практического использования изучаемого процесса.

С приближением концентрации окислителя в дутье к 100% при том же расходе дутья скорость процесса возрастает в 4–5 раз (см. рис. 1 и 3). Производимый при использовании кислородного дутья газ практически не содержит азота, поэтому после несложной переработки может быть использован в качестве синтез-газа при производстве синтетических углеводородов. Одновременно с газом во всем диапазоне исследованных расходов дутья производится постоянное и сравнительно большое количество среднетемпературного кокса (рис. 4). (Разброс значений выхода твердого продукта на рис. 4 обусловлен повышенной относительно воздушного дутья погрешностью эксперимента.) Получаемый с использованием кислородного дутья твердый продукт несколько уступает по качеству коксу, производимому в процессе карбонизации с ис-

пользованием воздушного дутья, однако по-прежнему обладает достаточно высокой и примерно постоянной калорийностью (порядка 25 МДж/кг) и может быть использован в качестве технологического топлива. Калорийность газа с увеличением расхода кислорода также остается примерно постоянной. Обнаружение изменений в обратном процессе слоевой газификации угля, возникающих при переходе от воздушного дутья к кислородному, легло в основу патента [7]. Новая технология слоевой газификации с обратным кислородным дутьем получила название «ТЕРМОКОКС-О<sub>2</sub>».

Следует отметить качественное изменение характера поведения обратного процесса газификации на кислородном дутье по сравнению с использованием воздушного дутья. Выход твердого продукта при трехкратном увеличении расхода кислорода остается постоянным (рис. 4). При этом линейно возрастают скорость тепловой волны и выход продуктового газа. Качественно изменяется и сам газ. Напомним, в случае использования воздушного дутья с возрастанием выхода газа пропорционально уменьшался выход твердого продукта. По-видимому, подобное поведение процесса в случае использования кислородного дутья связано с возрастанием скорости выхода летучих компонентов из твердой фазы при повышении максимальной температуры процесса. При этом скорость перемещения высокотемпературной области по слою угля также возрастает, а, значит, уменьшается время нагрева частиц. Однако глубина проработки частиц топлива остается постоянной за счет более интенсивного нагрева при меньшем времени его воздействия. Таким образом, при повышении расхода дутьевого кислорода сохраняется баланс между подводимым окислителем и топливом (выходящими из угля летучими), что приводит к постоянству калорийности газа, а также калорийности и выхода твердого продукта. К сожалению, инерционность термодинамики на данном этапе не позволила при столь высоких скоростях процесса с достаточной точностью определить максимальную температуру в тепловой волне: это является задачей дальнейших исследований.

### Заключение

Исследовано влияние расхода дутьевого воздуха, фракционного состава угля и расхода дутьевого кислорода на процесс слоевой газификации бурого угля с обратным дутьем. Определены диапазоны расходов дутьевого воздуха для целевых режимов работы слоевого газификатора. Изучены особенности технологических процессов в каждом из диапазонов, предложены способы их интенсификации. Обнаружен эффект существенного ускорения процесса при переходе к максимальной концентрации окислителя в дутье. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности работы газификаторов бурого угля с обратным воздушным дутьем на действующих заводах в России и Монголии, а также при проектировании новых предприятий на основе технологий «ТЕРМОКОКС-С» и «ТЕРМОКОКС-О<sub>2</sub>» для бурых углей.

### Литература

1. Пат. 2288937 РФ. Способ получения металлургического среднетемпературного кокса / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов (РФ). – № 2005132548/04; заявлено 24.10.2005; опубл. 10.12.2006, бюл. 34.
2. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. – 2-е изд. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 396 с.
3. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения и газификации топлива – М.: Металлургиздат, 1957. – 288 с.
4. Газификация угля / Г.-Д. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус. – М.: Недра, 1986. – 175 с.
5. Химические вещества из угля / Под ред. Ю. Фальбе. – М.: Химия, 1980. – 616 с.

6. Исламов С.Р. Современные процессы энерготехнологической переработки угля // Актуальные проблемы энергетики: м-лы III Междунар. науч.-практич. конф. – Екатеринбург: «ИРА УТК», 2007. – С. 88–90.
7. Пат. 2345116 РФ. МПК С10В 57/00, С10J 3.02 Способ получения кокса и синтез-газа при переработке угля / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, И.О. Михалев (РФ). – № 2007131530; заявлено 21.08.2007; опубл. 27.01.2009, бюл. 3.

- Михалев Игорь Олегович* – Сибирский федеральный университет, магистр техники и технологий, аспирант, инженер ООО «Энерготехнологическая компания «Сибтермо», [Igor.O.Mikhaliiov@gmail.com](mailto:Igor.O.Mikhaliiov@gmail.com)
- Исламов Сергей Романович* – ООО «Энерготехнологическая компания «Сибтермо», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, генеральный директор