

Влияние режимов инжекции на горение водоугольных суспензий**М. Таскын^{1,2}, З.А. Мансуров^{1,2*}, Б.Г. Топанов¹, З.М. Азизов¹, С.В. Алексеенко³**¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан³Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, Россия**ARTICLE INFO**Получено
14.05.2026Получено в исправленном виде
10.07.2026Принято
13.07.2026**Ключевые слова:**водоугольная суспензия; горение;
режим инжекции; температурное
поле; устойчивость пламени;
декарбонизация**АННОТАЦИЯ**

В работе исследовано влияние фронтальной и перпендикулярной инжекции на температурные поля и устойчивость горения водоугольных суспензий различного состава (ВУС). Эксперименты проведены на лабораторной установке с использованием термопары типа К для измерения температуры в различных зонах пламени. Исследованы суспензии с различным соотношением угля и воды. Установлено, что состав ВУС и режим подачи топлива существенно влияют на температурный режим и стабильность пламени. Наиболее устойчивое горение наблюдалось для состава 40/60, при котором максимальная температура достигала 1050-1080 °С. Показано, что перпендикулярная инжекция способствует формированию более равномерного температурного поля и снижению температурных колебаний по сравнению с фронтальной подачей. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности оптимизации режимов инжекции для повышения эффективности и устойчивости горения водоугольных суспензий.

1. Введение

В последние десятилетия развитие энергетики характеризуется устойчивым смещением акцентов в сторону снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду, повышения энергоэффективности и сокращения выбросов парниковых газов. В этом контексте углеродсодержащие топлива, прежде всего уголь, несмотря на их высокую распространенность и энергетическую ценность, рассматриваются как один из основных источников выбросов CO₂, CO, NO_x и твердых частиц [1]. Это обстоятельство обусловило активный поиск технологических решений, позволяющих сохранить энергетический потенциал угля при одновременном снижении экологических рисков его использования.

Одним из таких решений является применение ВУС, представляющих собой многокомпонентные дисперсные системы, включающие уголь, воду и, в ряде случаев, функциональные добавки, улучшающие реологические и стабилизационные свойства топлива. Как подчеркивается в фундаментальных исследованиях, ВУС занимают

промежуточное положение между твердыми и жидкими топливами, сочетая в себе высокую теплотворную способность угля и технологические преимущества жидких энергоносителей [2-5].

Результаты исследований показывают, что введение воды в угольное топливо существенно влияет на кинетику горения, приводя к снижению максимальной температуры пламени и интенсивности образования оксидов азота при сохранении достаточной теплотворной способности. Физико-химические свойства ВУС в значительной степени определяются составом исходного угля, степенью его дисперсности, а также наличием пластификаторов и поверхностно-активных веществ. Установлено, что при среднем размере частиц порядка 20-30 мкм достигается оптимальный баланс между реакционной способностью углерода и вязкостью суспензии, что способствует устойчивому горению и эффективному распыливанию топлива [6].

Процесс горения водоугольных суспензий характеризуется многостадийностью и включает последовательные этапы нагрева топлива, испарения влаги, пиролиза органической массы угля,

*Corresponding author: Z.A. Mansurov; E-mail address: zmansurov@kaznu.edu.kz

воспламенения летучих компонентов и последующего окисления твердого углеродного остатка [3, 5, 7]. Многостадийный характер процесса определяет специфику температурного режима и химического состава продуктов сгорания.

Как подчеркивается в работах [8-10], углекислый газ является неотъемлемым компонентом биосферных процессов. Ключевой задачей энергетики переходного периода является не исключение выбросов CO_2 , а их рациональное снижение за счет совершенствования технологий горения традиционных топлив.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния фронтальной и перпендикулярной инъекции ВУС различного состава на температурные поля и устойчивость горения.

В работе экспериментально исследованы температурные поля при фронтальной и перпендикулярной инъекции ВУС различного состава. Основное внимание уделено анализу пространственного распределения температуры и устойчивости горения при одинаковых условиях подачи топлива.

Научная новизна работы заключается в сравнительном исследовании фронтальной и перпендикулярной инъекции ВСУ различного состава в идентичных экспериментальных условиях. Выполнено сравнительное исследование пространственных температурных полей, устойчивости пламени и максимальных температур горения в зависимости от режима подачи топлива и состава ВСУ. Установлено, что перпендикулярная инъекция способствует формированию более равномерного распределения температуры и повышенной устойчивости процесса горения по сравнению с фронтальной подачей.

В отличие от ранее опубликованных исследований в настоящей работе выполнено прямое сопоставление фронтальной и перпендикулярной инъекции ВУС в идентичных экспериментальных условиях с анализом пространственных температурных полей и устойчивости пламени.

2. Материалы и методы исследования

Настоящий раздел посвящен описанию экспериментальной методики исследования температурных режимов горения ВУС при различных режимах инъекции топлива. Представленные материалы и методы ориентированы на обеспечение воспроизводимости экспериментов, корректности сравнения полученных данных и возможности сопоставления результатов с литературными источниками.

2.1. Исходные материалы и характеристики угля

В качестве исходного сырья использовали каменный уголь Шубаркольского месторождения (Казахстан). Уголь характеризуется низкой зольностью (3-8%), невысокой влажностью (4-8%), высоким выходом летучих веществ (38-48%) и низкой теплотой сгорания порядка 24-29 МДж/кг, что делает его перспективным для приготовления ВУС.

Перед приготовлением суспензий уголь подвергали механическому измельчению с целью получения заданного гранулометрического состава. Средний размер частиц угля после помола составлял порядка 30 мкм, что соответствует диапазону, наиболее часто используемому в экспериментальных и прикладных исследованиях по горению ВУС [11]. Такой размер частиц обеспечивает, с одной стороны, достаточную реакционную поверхность углерода, а с другой – приемлемые реологические характеристики суспензии.

2.2. Приготовление водоугольных суспензий

Водоугольные суспензии готовили путем смешения измельченного угля с дистиллированной водой в различных массовых соотношениях. Составы исследуемых ВУС и соответствующие массовые соотношения компонентов приведены в табл. 1. Выбор данного диапазона концентраций обусловлен необходимостью охвата как высокообводненных, так и более концентрированных суспензий, что позволяет выявить влияние содержания воды на процессы воспламенения и горения.

Таблица 1. Составы исследуемых водоугольных суспензий

Содержание угля, г	Объем воды, г	Масса пластификатора, г
20	80	1,0
30	70	1,0
40	60	1,0
50	50	1,0

Для приготовления ВУС в качестве пластифицирующей (диспергирующей) добавки использовали строительный суперпластификатор С-3, представляющий собой сульфированный продукт поликонденсации нафталинсульфоокислоты и формальдегида в форме натриевых солей

(sulfonated naphthalene formaldehyde, SNF). Добавка способствует снижению вязкости суспензии, улучшению диспергирования частиц угля и повышению седиментационной устойчивости.

Смешивание компонентов осуществляли механическим способом до получения визуально однородной суспензии. Перед каждым экспериментом ВУС перемешивали в течение 7-10 мин до получения однородного состава. Все образцы ВУС готовили непосредственно перед проведением экспериментов, что позволяло минимизировать влияние седиментации твердой фазы на результаты измерений.

2.3. Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводили на лабораторной установке для горения ВУС, представляющей собой модельную систему, воспроизводящую основные элементы топочного устройства энергетического назначения. Камера сгорания оснащена форсункой для подачи ВУС, системой подачи сжатого воздуха и вспомогательной газовой линией (пропан-бутан), использовавшейся на стадии розжига и стабилизации пламени. После выхода установки на устойчивый режим горения подачу вспомогательного газа прекращали и процесс горения поддерживали за счет энергии водоугольного топлива.

Общий вид и основные элементы экспериментальной установки приведены на рис. 1 (адаптировано по данным [2]). Регулирование расходов топлива и воздуха осуществляли с помощью запорной и регулирующей арматуры, что позволяло поддерживать воспроизводимые условия экс-

перимента при различных режимах инъекции.

На рис. 2 представлен экспериментальный стенд для исследования процессов горения ВУС. Стенд включает камеру сгорания цилиндрической формы, систему подачи ВУС, форсунку для распыления топлива и систему подачи воздуха. Для воспламенения и стабилизации пламени на начальном этапе использовали пропан-бутановую горелку. На рисунке 2А показан фронтальный вид камеры сгорания, а на рисунке 2Б – боковой вид установки с узлом подачи топлива и воздуха.

Подача воздуха в камеру сгорания осуществляли компрессором при избыточном давлении порядка 0,1-0,15 МПа. Расход пропан-бутановой смеси на стадии розжига составлял приблизительно 0,2-0,3 л/мин. Подачу ВУС осуществляли непрерывно через форсунку со средним расходом около 0,5-1,0 мл/с в зависимости от вязкости исследуемого состава. Температура окружающего воздуха во время экспериментов составляла 23,5-24,0 °С. Во всех экспериментах параметры подачи воздуха и топлива поддерживались постоянными, что обеспечивало сопоставимость результатов при различных режимах инъекции.

2.4. Режимы инъекции водоугольной суспензии

В рамках исследования реализованы два режима подачи ВУС в камеру сгорания:

- фронтальная инъекция, при которой ВУС вводили вдоль продольной оси камеры;
- перпендикулярная инъекция, при которой подачу топлива осуществляли ортогонально основному направлению газового потока.

Оба режима исследовали при идентичных ус-

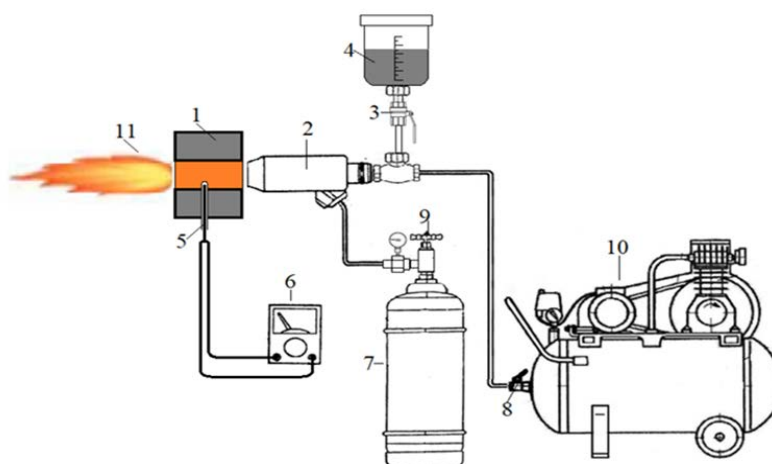


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для горения водоугольной суспензии: 1 – камера сгорания; 2 – форсунка; 3 – краны; 4 – емкость для ВУС; 5 – термопара; 6 – мультиметр; 7 – подача пропана; 8, 9 – регулирующие клапаны; 10 – компрессор; 11 – зона пламени. Воспроизведено из [2], опубликовано по лицензии CC BY 4.0.



Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда для горения водоугольной суспензии: (а) — фронтальный вид камеры сгорания; (б) — боковой вид установки с системой подачи топлива и воздуха.

ловиях подачи воздуха и одинаковых составах ВУС, что обеспечивало корректность сравнительного анализа и позволяло выделить влияние геометрии подачи топлива на температурные характеристики процесса горения.

2.5. Методика измерения температуры и условия проведения экспериментов

Измерение температуры в зоне пламени осуществлялось с использованием термопары типа Кс диапазоном рабочих температур от 200 до 1200 °С, подключенной к цифровому мультиметру. Для получения пространственного распределения температуры термопару перемещали в зоне горения с заданным шагом: вдоль фронта пламени — 1 см, в поперечном направлении — 0,5 см.

Погрешность измерений оценивали в пределах ± 10 °С. Каждое экспериментальное условие воспроизводилось не менее трех раз. Итоговые значения температуры рассчитывали как среднее арифметическое по результатам повторных измерений. Среднеквадратичное отклонение не превышало 35%, что подтверждает удовлетворительную воспроизводимость экспериментальных данных.

Максимальные температуры, зафиксированные в ходе экспериментов, достигали 1050-1080 °С в зависимости от состава ВУС и режима инжекции.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Общая характеристика температурных режимов горения ВУС

Эксперименты показали, что температурный режим горения ВУС существенно зависит от массового соотношения угля и воды, а также от ре-

жима инжекции топлива. Для всех составов ВУС формировались устойчивые зоны тепловыделения, однако их пространственное распределение и максимальные температуры различались.

Для высокообводненных суспензий (20/80 и 30/70) характерны пониженные максимальные температуры и выраженная неустойчивость пламени, обусловленные значительными тепловыми затратами на испарение влаги. При увеличении концентрации угля температурные показатели возрастали, а пламя становилось более стабильным; наилучшие результаты получены для состава 40/60.

Рис. 3 иллюстрирует характер горения различных составов ВУС. Основные выводы работы основаны на результатах температурных измерений.

3.2. Влияние состава ВУС на максимальные температуры горения

Анализ измерений выявил наличие экстремума зависимости максимальной температуры от состава ВУС. Для состава 40/60 максимальные температуры достигали 1080 °С. Экспериментальные значения максимальной температуры горения ВУС различного состава в зависимости расстояния от форсунки приведены в табл. 2.

Для более разбавленных суспензий (20/80 и 30/70) максимальные температуры, как правило, не превышали 800-850 °С. В этих условиях наблюдалось замедление воспламенения, а также увеличение протяженности зоны испарения воды, что негативно сказывалось на полноте сгорания углерода.

При дальнейшем увеличении концентрации угля (50/50) рост температуры не носил линейного характера. Несмотря на более высокую



Рис. 3. Влияние состава водоугольной суспензии на характер горения и формирование факела при различных соотношениях угля и воды.

теплотворную способность таких составов, повышение вязкости ВУС ухудшало условия распыливания и смешения топлива с окислителем. В результате формировались локальные зоны неполного сгорания, что приводило к снижению эффективной температуры пламени.

Следует отметить, что смещение максимальной температуры от среза форсунки наблюдается не только при горении ВУС, но и при горении газообразного пропана. Экспериментальные данные показывают, что в прифорсуночной зоне (0-5 мм) температура остается относительно низкой, поскольку в этой области преобладают процессы истечения струи топлива и его интенсивного смешения с окружающим воздухом, тогда как

химические реакции окисления протекают с ограниченной скоростью из-за недостатка кислорода.

В диапазоне расстояний порядка 10-25 мм от форсунки формируются условия, близкие к стехиометрическому соотношению пропана и воздуха, а также завершается период индукции процесса горения, что сопровождается максимальной интенсивностью тепловыделения.

Для более наглядного представления влияния состава ВУС на температурный режим горения максимальные значения температуры представлены на рис. 4.

Анализ графика показывает наличие экстремального характера зависимости температуры от состава ВУС. Максимальная температура горения (1080 °C) была зарегистрирована для состава 40/60, что свидетельствует о наличии оптимального соотношения угля и воды в исследованном диапазоне концентраций. При более высоком содержании воды часть тепловой энергии расходуется на ее испарение, что может приводить к снижению температуры горения. При увеличении содержания угля выше 40% наблюдается снижение максимальной температуры горения, что может быть связано с ростом вязкости суспензии, ухудшением распыливания топлива и снижением эффективности смешения с окислителем.

Полученный экстремум может быть объяснен конкуренцией двух противоположных факторов. С одной стороны, увеличение содержания угля может приводить к росту энергетической плотности топлива и потенциальному повышению

Таблица 2. Максимальные температуры горения водоугольных суспензий при различных режимах инъекции

Расстояние от форсунки, мм	Газ C_3H_8 , °C	20 г C/80 г H_2O , °C	30 г C/70 г H_2O , °C	40 г C/60 г H_2O , °C	50 г C/50 г H_2O , °C
0	570	495	470	330	380
5	650	540	580	730	530
10	810	880	870	900	800
15	930	960	960	1020	970
20	1000	1030	1000	1080	1030
30	830	840	720	900	990
40	730	680	550	740	880
50	680	630	490	580	830
60	600	580	400	460	750
70	580	450	380	440	680
80	490	245	310	400	600
90	440	220	280	360	580
100	380	200	220	250	430

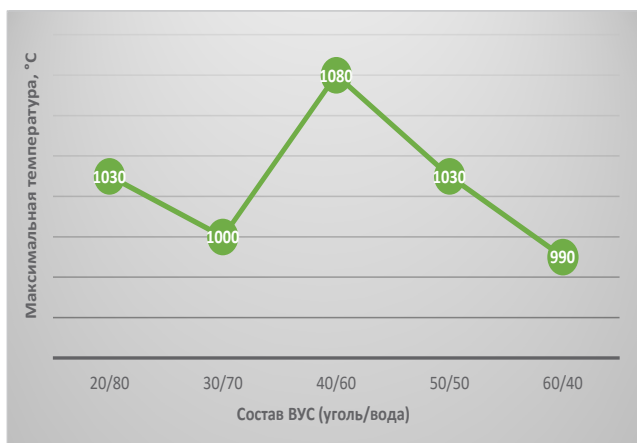


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры горения от состава водоугольной суспензии.

температуры горения. С другой стороны, уменьшение доли воды ухудшает процессы диспергирования и смешения топлива с окислителем вследствие повышения вязкости суспензии. При составе 40/60 достигается оптимальный баланс между тепловыделением, интенсивностью испарения влаги и эффективностью смесеобразования, что способствует формированию наиболее благоприятных условий для устойчивого горения.

При дальнейшем удалении от форсунки (более 25–30 мм) наблюдается снижение температуры, обусловленное истощением горючей смеси, разбавлением продуктов сгорания окружающим воздухом и ростом теплотерь. Таким образом, смещение температурного максимума на расстояние порядка 15–25 мм является характерной особенностью диффузионного газового пламени и обусловлено аэродинамикой струи и процессами смешения топлива с окислителем.

Полученные данные указывают на compro-

мисс между энергетической плотностью топлива и условиями распыливания: при концентрациях выше 50/50 рост вязкости ухудшает смешение и снижает эффективную температуру пламени.

Таким образом, экспериментально установлено существование оптимального состава ВУС (40/60), обеспечивающего максимальную температуру и наиболее устойчивое горение в исследованных условиях.

3.3. Сравнение фронтальной и перпендикулярной инъекции

Существенные различия выявлены при сравнении температурных полей, формируемых при различных режимах инъекции ВУС.

Следует отметить, что рис. 5 и 6 отражают температурные профили, полученные в различных направлениях измерений. На рис. 5 представлены продольные распределения температуры вдоль оси факела при фронтальной подаче топлива, тогда как на рис. 6 показаны поперечные распределения температуры при перпендикулярной инъекции. Поэтому различие формы кривых обусловлено особенностями направления измерений и не препятствует сопоставлению температурных режимов.

Пространственные распределения температуры в зоне пламени при различных режимах инъекции ВУС представлены на рис. 5 и 6.

При перпендикулярной инъекции температурные колебания снижались в среднем на 10–15% по сравнению с фронтальной подачей.

Для всех исследованных составов ВУС перпендикулярная инъекция обеспечивала более стабильный характер пламени по сравнению с

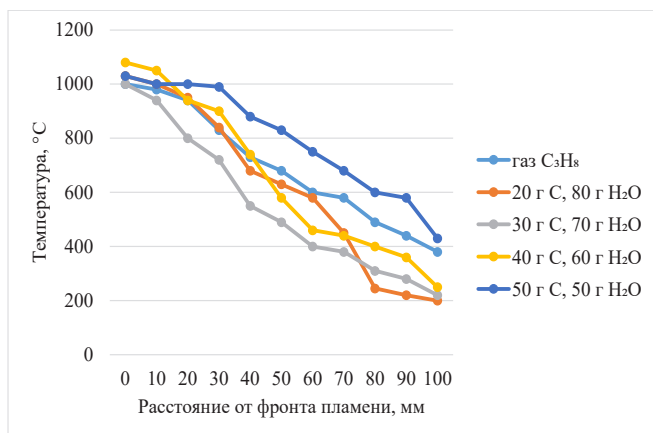


Рис. 5. Продольное распределение температуры в зоне пламени при фронтальной подаче водоугольной суспензии.

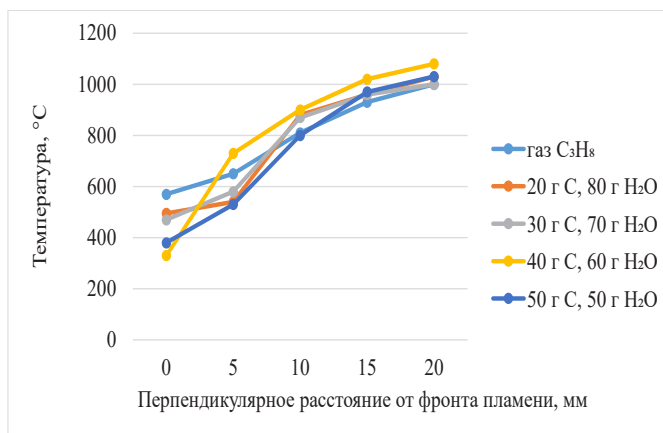


Рис. 6. Поперечное распределение температуры в зоне пламени при перпендикулярной инъекции водоугольной суспензии.

фронтальной подачей. Колебания температуры во времени менее выражены, что указывает на повышение устойчивости процесса горения.

Повышение устойчивости горения при перпендикулярной подаче может быть связано с изменением структуры течения в зоне смешения топлива с воздухом. Поперечная подача может способствовать формированию дополнительных вихревых структур, интенсифицирующих турбулентное перемешивание реагентов. В результате вероятно формируется более равномерное распределение частиц топлива по объему камеры сгорания и уменьшается вероятность образования локальных зон переобогащения или обеднения топливной смеси.

3.4. Пространственные температурные профили

Детальный анализ температурных профилей, полученных при перемещении термопары вдоль и поперек зоны пламени, позволил выявить характерные особенности распределения тепла. При фронтальной инжекции температурные профили имели асимметричный характер с выраженным максимумом в приосевой зоне.

При перпендикулярной инжекции температурные профили более сглаженные, а область максимальных температур занимала больший объем. Такой характер распределения температуры свидетельствует о более равномерном тепловыделении и снижении вероятности локальных перегревов, способных негативно влиять на элементы топочного оборудования.

Наблюдаемое расширение зоны высоких температур при перпендикулярной инжекции свидетельствует об увеличении объема активного горения. Данный эффект может быть обусловлен более выраженным вовлечением окружающего воздуха в реакционную зону и увеличением времени пребывания частиц топлива в области высоких температур. Это может способствовать более полному протеканию процессов испарения влаги, выделения летучих веществ и окисления углеродного остатка.

3.5. Обсуждение устойчивости горения

Устойчивость пламени является важнейшим критерием при оценке применимости ВУС в энергетических установках. Экспериментальные наблюдения показали, что устойчивое горение достигалось преимущественно при использова-

нии ВУС со средним содержанием угля и при перпендикулярной подаче топлива.

Для высокообводненных суспензий характерны периодические срывы пламени и необходимость использования вспомогательного источника тепла на стадии розжига. Напротив, для оптимального состава 40/60 пламя поддерживалось стабильно без дополнительной подпитки, что указывает на благоприятное сочетание тепловых и аэродинамических условий.

Повышенная устойчивость горения состава 40/60 может быть связана с оптимальным сочетанием теплофизических и реологических свойств суспензии. При данном соотношении компонентов обеспечивается достаточная концентрация горючего вещества для интенсивного тепловыделения, при этом содержание воды остается достаточным для эффективного распыления топлива и формирования развитой реакционной поверхности. В результате создаются благоприятные условия для воспламенения летучих веществ и последующего окисления углеродного остатка.

3.6. Экологические аспекты и косвенная оценка выбросов

Экологические характеристики процесса горения водоугольных суспензий в значительной степени определяются температурным режимом пламени и его пространственной неоднородностью.

Прямые измерения газовых выбросов (CO_2 , CO , NO_x) на данном этапе не проводились; оценка экологических аспектов осуществлялась на основе анализа температурных режимов и устойчивости пламени, что соответствует принятой в литературе практике при отсутствии газоаналитического оборудования [12–14].

В настоящей работе прямые измерения газовых выбросов не проводились.

Полученные температурные поля позволяют лишь предположить возможные экологические преимущества исследуемых режимов горения.

Для подтверждения этих выводов необходимы газоаналитические исследования.

3.7. Сопоставление с литературными данными

Полученные экспериментальные результаты в целом согласуются с выводами, представленными в ранее опубликованных работах, посвященных горению ВУС. В частности, подтвержде-

ны важность выбора оптимального соотношения угля и воды, а также значительная роль аэродинамических факторов, связанных с режимом подачи топлива.

Полученные максимальные температуры (1050-1080 °C) хорошо согласуются с результатами С.В. Алексеенко и др. [3, 6], представившими значения порядка 1000-1100 °C для суспензий аналогичного состава. Аналогично работам А.Р. Burdukov и др. [15], в настоящем исследовании выявлено существование оптимальной концентрации твердой фазы, обеспечивающей наиболее благоприятные условия горения. Вместе с тем в данной работе дополнительно показано влияние режима инжекции на пространственное распределение температуры, что расширяет представления о механизмах формирования температурного поля при горении ВУС.

В настоящей работе выполнено прямое экспериментальное сопоставление фронтальной и перпендикулярной инжекции водоугольных суспензий в идентичных условиях с анализом пространственных температурных полей. Полученные результаты позволяют рассматривать перпендикулярную инжекцию как более перспективный режим подачи топлива для повышения устойчивости и эффективности горения ВУС.

Ограничения исследования. К ограничениям настоящей работы относится отсутствие прямых измерений газовых выбросов и анализа дисперсного состава аэрозольных продуктов сгорания. Дальнейшие исследования будут направлены на проведение газоаналитических измерений и численного моделирования процесса горения.

4. Заключение

Экспериментально исследовано влияние состава ВУС и режима инжекции на температурные поля и устойчивость горения. Установлено, что увеличение содержания воды может приводить к снижению температуры горения и ухудшению стабильности пламени вследствие дополнительных тепловых затрат на испарение влаги.

Наиболее устойчивое горение наблюдалось для состава 40/60, при котором максимальная температура достигала 1080 °C, тогда как для состава 20/80 она не превышала 1030 °C. Показано, что перпендикулярная инжекция формирует более равномерное температурное поле и характеризуется повышенной устойчивостью пламени по сравнению с фронтальной подачей. Полученные результаты подтверждают выводы, представленные

в литературе, и позволяют рассматривать данный состав ВУС как оптимальный с точки зрения обеспечения устойчивого горения при умеренном содержании угля.

Полученные результаты полностью соответствуют экспериментальным данным, представленным в табл. 2 и на рис. 4-6.

Установлено, что повышение эффективности горения определяется не только изменением состава ВУС, но и особенностями аэродинамической организации процесса. Перпендикулярная инжекция способствует интенсификации процессов смешения топлива с окислителем, формированию более однородного температурного поля и увеличению объема активной зоны горения.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности оптимизации режимов инжекции как инструмента повышения эффективности и стабильности горения ВУС. Практическая значимость работы связана с возможностью использования полученных данных при разработке технологий низкоуглеродного горения угольных топлив.

Author Contributions

Merey Taskyn: Conceptualization; Investigation; Data Curation; Formal Analysis; Visualization; Writing – Original Draft. **Zulkhair Mansurov:** Supervision; Conceptualization; Writing – Review & Editing. **Bolat Topanov:** Supervision; Methodology; Formal Analysis; Validation. **Ziyaddin Azizov:** Investigation; Data Curation; Formal Analysis. **Sergey Alekseenko:** Validation; Formal Analysis; Writing – Review & Editing.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- [1]. Z.A. Mansurov (Ed.). Some Problems of Decarbonization and Alternative Energy. Daryn, Almaty. 2024, 246 p.
- [2]. Zh. Korkembay, B.G. Topanov, E. Zhumataev, B. Kaidar, Z.A. Mansurov. Investigation of combustion of water-coal mixture. Combustion and Plasma Chemistry 19 (2021) 339-346. (In Russ.). <https://doi.org/10.18321/cpc472>.
- [3]. S.V. Alekseenko, L.I. Maltsev, I.V. Kravchenko, A.A. Dekterev, V.A. Kuznetsov. Review of works on the preparation of coal water fuel and its combustion in boilers. Combustion and Plasma

- Chemistry 19 (2021) 265-277. (In Russ.). <https://doi.org/10.18321/cpc464>.
- [4]. G.A. Núñez, M.I. Briceño, D.D. Joseph, T. Asa. Colloidal Coal in Water Suspensions. *Energy & Environmental Science* 3 (2010) 629-640. <https://doi.org/10.1039/b923601p>.
- [5]. I. Sverchkov, M. Chukaeva, V. Matveeva. Influence of Preparation and Combustion Parameters of Coal-Water Slurries on Gas Emission Chemistry. *Environmental Science and Pollution Research* 29 (2022) 44042-44053. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19038-9>.
- [6]. S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, A.A. Dekterev, V.A. Kuznetsov, L.I. Maltsev, et al. Experimental and Numerical Investigation of Aerodynamics of a Pneumatic Nozzle for Suspension Fuel. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 77 (2019) 288-298. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013>.
- [7]. H. Liu, Z. Li, Y. Yang, G. Miao, P. Li, et al. Investigation of the Effect of Different Distilled Water, Rainwater and Seawater Mass Ratios on Coal Spontaneous Combustion Characteristics. *Science of the Total Environment* 900 (2023) 165878. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165878>.
- [8]. Z.A. Mansurov, V.G. Salnikov. Some Problems of Environmentally Friendly Combustion of Coal-Water Mixtures. *Combustion and Plasma Chemistry* 19 (2021) 279-288. (In Russ.). <https://doi.org/10.18321/cpc465>.
- [9]. D.Yu. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.S. Tamashevich. Impact of Woody Biomass in the Composition of Coal-Water Suspensions on Their Transportation and Combustion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 335 (2024) 71-80. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4646>.
- [10]. F. Li, B. Yu, G. Wang, H. Fan, T. Wang, et al. Investigation on Improving Ash Fusion Temperature (AFT) of Low-AFT Coal by Biomass Addition. *Fuel Processing Technology* 191 (2019) 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.03.005>.
- [11]. G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. Kostoreva, A.A. Omarov, N.Y. Gutareva. Mathematical and Physical Modeling of the Processes of Reducing Anthropogenic Oxides During the Combustion of Water-Saturated Fuels. *Combustion and Flame* 274 (2025) 113969. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2025.113969>.
- [12]. A.I. Klimenko, A.G. Klimenko, S.N. Emelianov. Influence of Coal Concentration in Coal-Water Suspension on the Processes of Their Interaction of Drops with Solid Particles. *Prospects for the Development of Fundamental Sciences* (2024).
- [13]. M. Belonogov, V. Dorokhov, D. Glushkov, D. Kuznechenkova, D. Romanov. Combustion Characteristics of Coal-Water Slurry Droplets in High-Temperature Air with the Addition of Syngas. *Energies* 16 (2023) 3304. <https://doi.org/10.3390/en16083304>.
- [14]. V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak. Composition of a Gas and Ash Mixture Formed During the Pyrolysis and Combustion of Coal-Water Slurries Containing Petrochemicals. *Environmental Pollution* 285 (2021) 117390. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117390>.
- [15]. A.P. Burdukov, V.I. Popov, V.G. Tomilov, V.D. Fedosenko. The Rheodynamics and Combustion of Coal-Water Mixtures. *Fuel* 81 (2002) 927-933. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00009-6).

About the Authors

M. Taskyn – PhD Student, Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

E-mail: Merey0025@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1577-4483>

Z.A. Mansurov – Doctor of Chem. Sci., Professor, Academician of the NAS of the Republic of Kazakhstan, ICP, Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

E-mail: zmansurov@kaznu.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8956-216X>

B.G. Topanov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, ICP, Almaty, Kazakhstan

E-mail: topikbolat@mail.ru

Z.M. Azizov – Researcher, ICP, Almaty, Kazakhstan

E-mail: azizov_ziyaddin@mail.ru

S.V. Alekseenko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academician of the RAS, Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: aleks@itp.nsc.ru

Effect of Injection Mode on the Combustion Characteristics of Coal-Water Slurries

M. Taskyn^{1,2}, Z.A. Mansurov^{1,2*}, B.G. Topanov¹, Z.M. Azizov¹, S.V. Alekseenko³

¹Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbai Batyr Str., Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan

³Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Akademika Lavrentyev Ave., 1, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

The influence of frontal and perpendicular injection on temperature fields and combustion stability of coal-water slurries with different compositions was investigated experimentally. The experiments were carried out using a laboratory-scale combustion setup equipped with a K-type thermocouple for temperature measurements in different flame zones. Slurries with different coal-to-water ratios were studied. The results showed that both slurry composition and injection mode significantly affect combustion temperature and flame stability. The most stable combustion was observed for the 40/60 composition, where the maximum temperature reached 1050-1080 °C. It was found that perpendicular injection provides a more uniform temperature distribution and lower temperature fluctuations compared with frontal injection. The obtained results demonstrate the potential of injection mode optimization for improving the efficiency and stability of coal-water slurry combustion.

Keywords: coal-water slurry, combustion, injection mode, temperature field, flame stability, decarbonization

Су-көмір суспензияларының жануына инжекция режимдерінің әсері

М. Таскын^{1,2}, З.А. Мансұров^{1,2*}, Б.Г. Топанов¹, З.М. Азизов¹, С.В. Алексеенко³

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даң., 71, Алматы, Қазақстан

³С.С. Кутателадзе ат. Жылуфизика институты СО РАН, Академик Лаврентьев даң., 1, Новосибирск, Ресей

АҢДАТПА

Жұмыста әртүрлі құрамдағы су-көмір суспензияларының жану процесіне фронтальды және перпендикулярлы инжекция режимдерінің температуралық өрістер мен жану тұрақтылығына әсері зерттелді. Эксперименттер жалынның әртүрлі аймақтарындағы температураны өлшеуге арналған К типті термопарамен жабдықталған зертханалық қондырғыда жүргізілді. Көмір мен судың әртүрлі арақатынастарындағы суспензиялар зерттелді. Су-көмір суспензиясы құрамы мен отынды беру режимі температуралық режим мен жалын тұрақтылығына елеулі әсер ететіні анықталды. Ең тұрақты жану 40/60 құрамында байқалды, бұл кезде максималды температура 1050-1080 °C-қа жетті. Перпендикулярлы инжекция фронтальды берумен салыстырғанда температуралық өрістің біркелкілігін және температура ауытқуларының төмен болуын қамтамасыз ететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер су-көмір суспензияларын жағу тиімділігі мен тұрақтылығын арттыру үшін инжекция режимдерін оңтайландырудың перспективалы екенін көрсетті.

Түйін сөздер: су-көмір суспензиясы, жану, инжекция режимі, температуралық өріс, жалын тұрақтылығы, декарбонизация