

Литвин-Попович А. И.,
Щекин С. Р.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РЛС

В работе рассмотрены методы учета высотно-временной корреляции параметров атмосферы для снижения погрешностей измерения скорости ветра радиолокационными системами вертикального зондирования атмосферы. Снижение величины погрешностей проиллюстрировано результатами имитационного моделирования. При этом использованы данные натурных экспериментов, проведенных на радиолокационных станциях вертикального зондирования.

Ключевые слова: радиолокационное зондирование атмосферы, цифровая обработка радиолокационных сигналов, использование априорной информации.

1. Введение

Радиолокационные станции вертикального зондирования атмосферы используются при решении большого количества задач. К их числу, прежде всего, относятся: получение сведений о характере турбулентных образований в нижних слоях атмосферы; фиксация скорости их перемещения; формирование профиля скоростей ветра; разрешение получаемых от исследуемой цели сигналов, распространяющихся на фоне многочисленных источников помех [1]. Большая часть происходящих в атмосфере процессов, таких как перенос атмосферной пыли и водяного пара, теплообменные процессы, формирование облаков и осадков, тесно связаны с турбулентным характером движений в атмосфере [1, 2]. Атмосферная турбулентность оказывает существенное влияние на распространение звука, света, радиоволн и влияет на условия полетов летательных аппаратов.

Современные требования сетей метеообеспечения и авиации включают оценку средних значений метеовеличин за временной интервал 2–5 минут, при точности определения скорости ветра не более 1 м/с [1, 3]. В РЛС ВЗ построение профиля скорости ветра осуществляется по сигналам, отраженным от неоднородностей диэлектрической проницаемости атмосферы, образование которых обусловлено неравномерным нагревом подстилающей поверхности. Наиболее распространенной является оценка параметров сигнала посредством анализа его спектра [1, 4, 5, 6]. Входной сигнал представляет собой случайный процесс, поэтому измерение параметров по выборочному спектру дает статистически неустойчивые оценки [7]. В связи с этим, возникает задача минимизации величины погрешности оценивания метопараметров. Сложный характер отраженного сигнала и низкие показатели соотношения сигнал/шум на входе системы создают необходимость полного использования априорной информации о статистических и спектральных характеристиках отражений в процессе обработки данных РЛС ВЗ.

В атмосфере динамические параметры не могут изменяться мгновенно со временем или с высотой, поскольку она представляет собой инерционную среду. Априорный учет этого свойства среды в процессе разработки методов обработки рассеянных сигналов,

вторичной обработки и контроля качества результатов, позволяет снизить погрешности оценивания осредненного профиля скорости ветра, а также высотно-временные зависимости скорости ветра [8].

2. Постановка задачи

Методы оценивания параметров радиолокационных сигналов можно разделить на параметрические и непараметрические [1, 5]. Параметрические методы обработки используют априорные сведения о сигнале, часто — в форме его модели, и производят оценивание параметров сигнала на основе этой модели. При этом вводится метрика, описывающая степень отличия реального сигнала от модели, и вычисляется значение этой метрики для ряда предполагаемых значений параметров сигнала. Те значения параметров, для которых метрика отличия (невязка) минимальна, принимаются как оценки параметров сигнала. Невязка:

$$\varepsilon(\alpha_1 \dots \alpha_n) = f(x, g(\alpha_1 \dots \alpha_n)). \quad (1)$$

Здесь g — модель рассеянного сигнала, $\alpha_1 \dots \alpha_n$ — неизвестные параметры, f — метрика невязки. В качестве метрики невязки часто используется среднеквадратическое отклонение:

$$\varepsilon(\alpha_1 \dots \alpha_n) = \sigma(x - g(\alpha_1 \dots \alpha_n)).$$

К этой категории методов относятся: метод наименьших квадратов, методы авторегрессионного спектрального оценивания и т. д. Каждый из этих методов реализует оценивание информативных параметров конкретного сигнала, в соответствии с заложенной в метод моделью. Это обстоятельство ограничивает применимость метода к иным сигналам (его робастность).

Непараметрические методы обработки не используют какой-либо априорной информации о сигнале, поэтому они применимы к широкому классу сигналов. Вместе с тем, отсутствие априорной информации на этапе оценивания параметров приводит к увеличению погрешности оценки. К классу непараметрических методов оценивания относятся: метод максимумов, метод моментов, циклический метод моментов [5].

Рассмотрим задачу оценивания параметров сигнала, рассеянного атмосферными неоднородностями. Вследствие инерционности среды (атмосферы), ее параметры изменяются во времени и в пространстве с конечной скоростью [1, 8]. В связи с этим, можно записать:

$$v(t, h) = v(t-1, h) + \Delta v_t, \quad (2)$$

$$v(t, h) = v(t, h-1) + \Delta v_h, \quad (3)$$

причем приращения скорости ветра Δv_t и Δv_h конечны и ограничены. Имеющиеся результаты измерений [8] позволяют оценить пространственную и временную корреляционные функции вариаций скорости ветра и предельные величины Δv_t и Δv_h . Таким образом, можно использовать информацию о предыдущих оценках скорости ветра и ширины спектра сигнала в качестве начального приближения при оценивании этих параметров.

3. Модель высотно-временных вариаций скорости ветра

По результатам анализа результатов зондирования атмосферы РЛС ВЗ дециметрового диапазона [1], получены спектры и корреляционные функции высотных и временных вариаций скорости ветра [8]. Автокорреляционные функции вариаций скорости ветра по времени и по высоте представлены на рис. 1 и 2, соответственно.

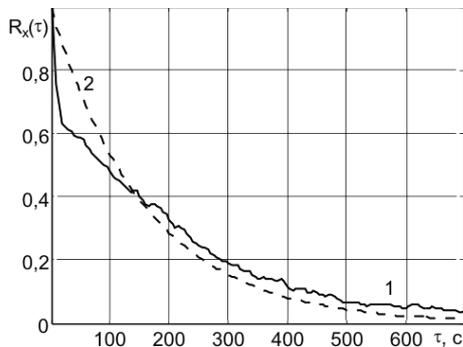


Рис. 1. Автокорреляционная функция временных вариаций скорости ветра (1 — построенная по данным зондирования, 2 — аппроксимация экспонентой) [3]

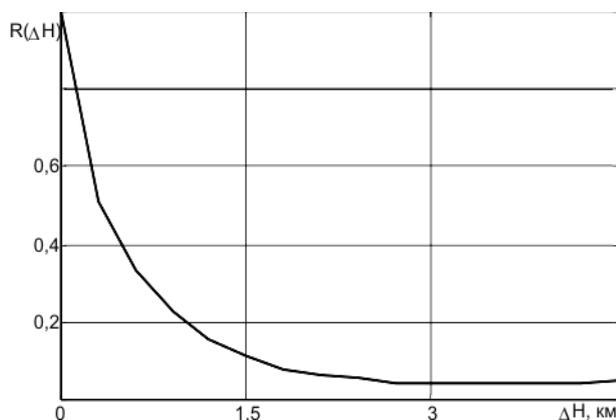


Рис. 2. Автокорреляционная функция высотных вариаций скорости ветра [3]

Обе корреляционные функции вариаций скорости ветра аппроксимируются экспонентами. Таким образом,

модель вариаций скорости ветра представляет собой двумерный экспоненциально-коррелированный случайный процесс. В табл. 1 приведены статистические характеристики приращений Δv_t и Δv_h .

Таблица 1

Доверительная вероятность, %	Относительное приращение скорости ($\Delta v/v_{\max}$)	
	По высоте (за 300 м)	По времени (за 1 с)
50	0,056	0,001
75	0,106	0,019
90	0,157	0,027
95	0,189	0,033
99	0,252	0,044
99.9	0,325	0,057
100 (макс. приращение)	0,654	0,121

По данным, приведенным в табл. 1, можно оценить предельное приращение скорости ветра относительно последнего проведенного измерения.

4. Методы параметризации спектров рассеянных сигналов

В качестве опорных результатов, рассмотрим следующие:

1. Метод наименьших квадратов с процедурой по координатного спуска (МНК ПС) [5, 6].
2. Метод наименьших квадратов с процедурой полного вычисления целевой функции (МНК ПВ) [9, 10].
3. Метод максимумов [1, 5].
4. Метод моментов [1, 5].

Здесь и далее, оцениваемые параметры будем обозначать в общем виде как α_i , при этом α_1 — центральная частота рассеянного сигнала, а α_2 — ширина спектра.

Можно предложить следующие подходы использования априорной информации при оценивании параметров сигналов:

1. При параметризации методом наименьших квадратов использовать предыдущие оценки в качестве начального приближения, и использовать метод по координатного спуска. При этом параметры сигнала определяются по минимумам сечений невязки параметризации (1). При этом при оценивании центральной частоты сигнала берется сечение при $\alpha_2 = \alpha_2(t-1)$, а при оценивании ширины спектра — сечение при $\alpha_1 = \alpha_1(t-1)$.

2. Использовать метод полного вычисления целевой функции и ограниченную область поиска. При этом область поиска минимума невязки параметризации (1) ограничена окрестностью априорных значений с допусками $\Delta \alpha_i$, так что выражение (1) вычисляется для $\alpha_1 \in [\alpha'_1 - \Delta \alpha_1 \dots \alpha'_1 + \Delta \alpha_1]$ и $\alpha_2 \in [\alpha'_2 - \Delta \alpha_2 \dots \alpha'_2 + \Delta \alpha_2]$. Такое ограничение области поиска снижает вычислительные затраты.

3. Использовать методы параметризации без каких-либо видоизменений, однако добавить перед процедурой параметризации полосовой фильтр, параметры которого устанавливаются в соответствии с последней удачной оценкой.

В качестве метрики погрешностей будем использовать средний модуль отклонения оценки параметра от истинного значения:

$$M(\alpha_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\alpha_i(j) - \alpha_i'(j)|. \quad (4)$$

Также примем следующие обозначения. Пусть ϵ — предельно допустимое отклонение оценки параметра α , то есть предполагается, что

$$M(\alpha_i) \leq \epsilon_i. \quad (5)$$

Поскольку результат оценивания параметра в присутствии шумов является случайной величиной, то (5) в общем случае выполняется не для всех результатов, а для некоторой их части

$$D(\epsilon) = \frac{n\{M(\alpha_i) \leq \epsilon_i\}}{N}. \quad (6)$$

Величина, обратная (6), показывает вероятность промахов при измерениях, для заданного предельного отклонения оценки:

$$C(\epsilon) = \frac{100}{D(\epsilon)}. \quad (7)$$

5. Представление результатов

На рис. 3 приведены исходные зависимости величины (7) от отношения сигнал/шум q , полученные без использования информации о предыдущих значениях параметров рассеянного сигнала. При этом наибольшее значение вероятности промахов соответствует методу моментов (кривая 2), а наименьшее — методу наименьших квадратов (кривая 4). Допустимая погрешность оценки скорости ветра ϵ_1 здесь и далее принята равной 1 м/с, диапазон скоростей ветра при моделировании — ± 25 м/с, относительная ширина спектра рассеянного сигнала — 0,04.

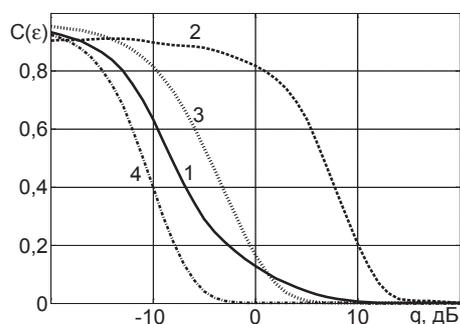


Рис. 3. Зависимость вероятности промаха измерений от ОСШ: 1 — метод максимумов, 2 — метод моментов, 3 — циклический метод моментов, 4 — МНК ПВ

На рис. 4 приведена зависимость вероятности промаха измерений для случая использования априорной информации. В данном случае в качестве априорной информации принято предыдущее значение параметров сигнала, заданное в модели. Для кривых 1...4 (нумерация соответствует рис. 3) априорная информация учтена путем фильтрации рассеянного сигнала.

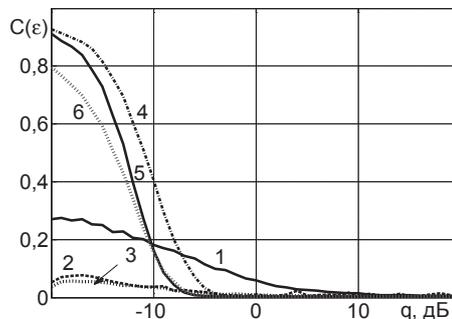


Рис. 4. Зависимость вероятности промаха измерений от ОСШ для спектральной ширины 0,04. 1 — метод максимумов, 2 — метод моментов, 3 — циклический метод моментов, 4 — МНК ПС, 5 — МНК ПС с априорной информацией, 6 — МНК ПВ с априорной оценкой

Наименьшую вероятность промаха обеспечивают метод моментов и циклический метод моментов (кривые 2, 3), несколько худшие результаты показывает метод максимумов (кривая 1). Описанный случай представляет собой идеализацию: в реальной системе априорные данные о сигнале известны с некоторой погрешностью. На рис. 5 приведена зависимость вероятности промаха измерений от погрешности задания априорных данных для отношения сигнал/шум 10 дБ. При этом допустимая величина отклонения скорости ветра для МНК ПС и МНК ПВ принята равной 0,125 (в соответствии с данными табл. 1).

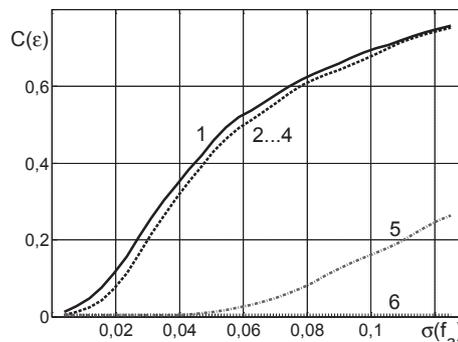


Рис. 5. Зависимость вероятности промаха измерений от величины погрешности априорных данных при $q = 10$ дБ. 1 — метод максимумов, 2 — метод моментов, 3 — циклический метод моментов, 4 — МНК ПС, 5 — МНК ПС с априорными данными, 6 — МНК ПВ с априорными данными

Для метода максимумов, метода моментов, циклического метода моментов и МНК (кривые 1...4) вероятность промахов быстро возрастает с ростом ошибки априорных данных. Для МНК ПС вероятность промахов возрастает существенно медленнее (кривая 5), а для МНК ПВ в данном модельном эксперименте вероятность промахов пренебрежимо мала (кривая 6).

На рис. 6—8 приведены оценки вероятности промахов от соотношения сигнал/шум, построенные для случая использования априорной информации от предыдущего сеанса измерений. Таким образом, оценка параметров сигнала для момента t_{i-1} является опорной для процедуры оценивания параметров в момент t_i .

Наибольший выигрыш от использования априорной информации получает метод моментов. Однако при сравнении полученных результатов (кривая 2 на рис. 6—8) становится очевидно, что результирующая вероятность промахов для всех трех методов получается фактически

одинаковой. Таким образом, правильнее говорить о том, что метод моментов обеспечивает наилучшие результаты без априорной информации.

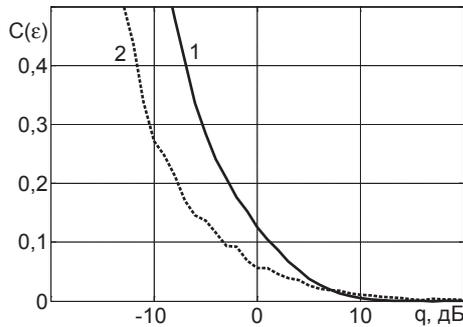


Рис. 6. Вероятность промаха оценивания (допуск 1 м/с). 1 — метод максимумов, 2 — то же, с фильтрацией в соответствии с априорной оценкой

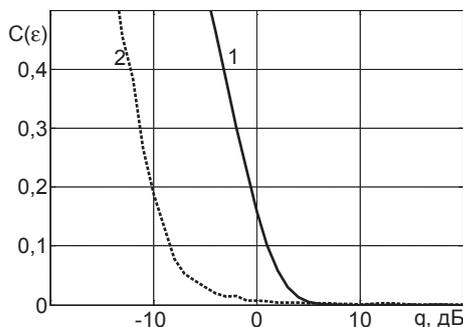


Рис. 7. Вероятность промаха оценивания (допуск 1 м/с). 1 — метод моментов, 2 — то же, с фильтрацией в соответствии с априорной оценкой

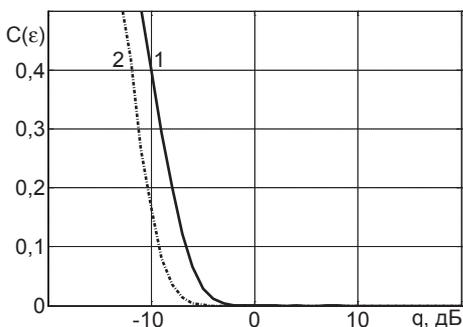


Рис. 8. Вероятность промаха оценивания (допуск 1 м/с). 1 — метод наименьших квадратов, 2 — то же, с использованием априорной информации

На рис. 9 приведена зависимость энергетического выигрыша от предельной вероятности промаха оценки. Под энергетическим выигрышем понимается разность между минимальным отношением сигнал/шум, при котором обеспечивается требуемая вероятность промаха без априорных данных, и такой же величиной в случае использования априорных данных.

Наибольший выигрыш наблюдается для метода моментов (кривая 2). Выигрыш для метода наименьших квадратов (кривая 3) составляет порядка 2,5 дБ. Для метода максимумов выигрыш непостоянен, а при малых допустимых вероятностях промаха даже отрицателен.

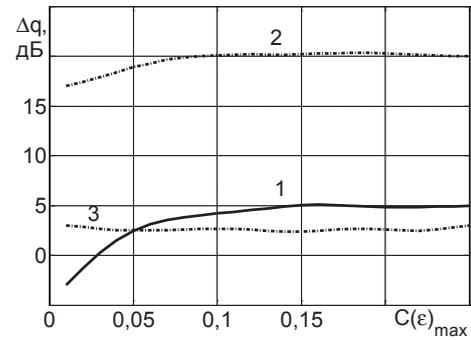


Рис. 9. Зависимость предельного энергетического выигрыша от допустимой вероятности промахов измерений (1 — метод максимумов, 2 — метод моментов, 3 — МНК)

5. Выводы

Использование априорной информации при обработке рассеянных сигналов позволяет снизить величину погрешностей оценок параметров сигнала. При этом максимальный выигрыш соответствует тем методам обработки, которые не используют информации о структуре и свойствах сигнала (например, метод максимума и метод моментов). В то же время, даже для метода наименьших квадратов оказывается возможным добиться улучшения характеристик, эквивалентного повышению отношения сигнал/шум в приемном тракте РЛС на величину 2,5 дБ.

Литература

1. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли [Текст] / под общ. ред. Б. Л. Кащеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. — 426 с.
2. Довиак, Р. Доплеровские локаторы и метеорологические наблюдения [Текст] / Р. Довиак, Д. Зрнич. — Л.: Гидрометеоздат, 1988. — 503 с.
3. Wind profiler assessment report [Text]. — NOAA, Silver Spring, Maryland, 1994. — 141 p.
4. Strauch, R. G. Data analyses techniques: spectral processing [Text] / R. G. Strauch // Handbook for middle atmosphere program. — Urbana, Illinois. — 1983. — Vol. 9. — Pp. 528–531.
5. Литвин-Попович, А. И. Параметризация спектров рассеянных сигналов в РЛС вертикального зондирования атмосферы [Текст] / А. И. Литвин-Попович, В. Н. Олейников // Радиотехника. — 2008. — Вып. 152. — С. 49–52.
6. Литвин-Попович, А. И. Особенности реализации методов оценивания параметров рассеянных сигналов в системах дистанционного зондирования атмосферы [Текст] / А. И. Литвин-Попович, В. Н. Олейников // Радиотехника. — 2009. — Вып. 160. — С. 314–320.
7. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем [Текст]: учеб. пособие для вузов / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. — М.: Радио и связь, 2004. — 608 с.ил.
8. Литвин-Попович, А. И. Методы вторичной обработки информации в радиолокационных системах вертикального зондирования атмосферы [Текст] / А. И. Литвин-Попович // Прикладная радиоэлектроника. — Х.: ХНУРЭ, 2011. — Т. 10. — № 3. — С. 295–301.
9. Литвин-Попович, А. И. Обработка радиолокационных сигналов в параллельных вычислительных системах [Текст] / А. И. Литвин-Попович // Радиотехника. — Х.: ХНУРЭ, 2011. — Вып. 166. — С. 165–172.
10. Литвин-Попович, А. И. Анализ состояния атмосферы на малых временных интервалах [Текст] / А. И. Литвин-Попович, В. Н. Олейников // Прикладная радиоэлектроника. — Х.: ХНУРЭ, 2010. — Т. 9. — № 4. — С. 513–520.

ВИКОРИСТАННЯ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ОБРОБЦІ СИГНАЛІВ В МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ РЛС

В роботі розглянуто методи урахування висотно-часової кореляції параметрів атмосфери для зниження похибок вимірів швидкості вітру радіолокаційними системами вертикального зондування атмосфери. Зниження похибок проілюстровано результатами імітаційного моделювання. При цьому використані дані натурних експериментів, які проведені на радіолокаційних станціях вертикального зондування.

Ключові слова: радіолокаційне зондування атмосфери, цифрова обробка радіолокаційних сигналів, використання апріорної інформації.

Литвин-Попович Андрій Ігорович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра радіоелектронних систем,

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина, e-mail: andrey_res@ukr.net.

Щекін Сергій Радиславович, радиотехнічний факультет, Харьковський національний університет радіоелектроніки, Украина, e-mail: sergey_shchekin@ukr.net.

Литвин-Попович Андрій Ігорович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра радіоелектронних систем, Харьковський національний університет радіоелектроніки, Украина.

Щекін Сергій Радиславович, радиотехнічний факультет, Харьковський національний університет радіоелектроніки, Украина.

Lytvyn-Popovych Andrew, Kharkov National University of Radio Electronics, Ukraine, e-mail: andrey_res@ukr.net.

Shchekin Sergey, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, e-mail: sergey_shchekin@ukr.net

УДК 66.096.5

**Логвин В. О.,
Безносик Ю. О.,
Корінчук К. О.,
Кіржнер Д. А.**

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ РОЗПАЛЮВАННЯ НИЗЬКОЯКІСНОГО ВУГІЛЛЯ У НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОМУ КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Розглянуті способи розпалення низькоякісного вугілля у топці з низькотемпературним киплячим шаром. Приведені результати експериментальних досліджень розпалення на лабораторній установці. Виявлені залежності підвищення температури з часом, на базі яких визначені співвідношення палива та повітря для підтримання діапазону робочих температур розпалювання. Отримані результати лягли в основу створення технології стійкого і безпечного розпалювання точки.

Ключові слова: низькотемпературний киплячий шар (НТКШ), розпалювання, псевдозріджений шар, вугілля марки Д, антрацитовий штиб (АШ).

1. Вступ

Підвищення ціни на природний газ стимулює розвиток у галузі житлово-комунальних і промислових підприємств України, до переходу на місцеві більш дешеві низькоякісні палива на базі використання енергоефективних технологій. Так, у Загальнодержавній програмі реформування і розвитку житлово-комунального господарства на 2009–2014 роки, затвердженою Законом України N 1869-IV від 24 червня 2004 року, передбачено впровадження проєктів з переведення підприємств житлово-комунального господарства на місцеві види палива [1]. Одним із таких напрямків, може бути технологія спалювання твердого палива у киплячому шарі (КШ). Впровадження технології спалювання твердого палива в КШ може забезпечувати використання низькоякісного палива (бурого вугілля, сланців, торфу, вугільних відходів та іншого) і є економічно доцільним, так як дозволяє знизити собівартість виробництва енергії, та екологічно чистим у порівнянні з традиційними способами спалювання [2]. Однак, впровадження технології спалення твердого палива у КШ потребує додаткових досліджень, зокрема досліджень щодо способів розпалювання при різних режимах псевдозрідження, а та-

кож вироблення рекомендацій щодо технологій розпалу низькоякісних палив у топках НТКШ [3].

2. Технологічна база для проведення досліджень з розпалу низькоякісного вугілля у НТКШ

Для дослідження процесів розпалювання низькоякісного вугілля у НТКШ використовувалась вогнева лабораторна установка для спалення палива у КШ, схема якої приведена на рис. 1.

Технологія роботи вогневої установки полягає в наступному: дуттьове повітря за допомогою дуттьового вентилятора (1) подається у камеру змішування (3), змішується з пропан-бутановою сумішшю (у випадку розпалювання за рахунок пропан-бутану), яка подається з газового балону (8), проходить через повітророзподільну решітку (4), діаметром отворів 1 мм, та зріджує тверде паливо, що знаходиться у камері згоряння — кварцовій камері (5) з $d = 59$ мм. Димові гази через вентиляційний зонт (6) виводяться витяжним вентилятором (7).

Регулювання витрати повітря здійснюється за рахунок зміни обертів дуттьового вентилятора за допомогою