

ISBN 978-83-66216-05-1

ЛИПАНТЬЕВ Р.Е., ТУТУБАЛИНА В.П.

# **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СЕРНИСТЫХ МАЗУТОВ К СЖИГАНИЮ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ**

**МОНОГРАФИЯ**

 **iScience**

Варшава, Польша - 2018

ФГБОУ ВО «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЛИПАНТЬЕВ Р. Е., ТУТУБАЛИНА В. П.

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ  
ПОДГОТОВКА СЕРНИСТЫХ МАЗУТОВ  
К СЖИГАНИЮ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
КОТЛОВ**

**МОНОГРАФИЯ**

**Варшава-2018**

*Авторы:*

*Липантьев Р. Е., Тутубалина В. П.*

*Рецензенты:*

*Хамидуллин Р. Ф., д.т.н., профессор кафедры «Общей химической технологии» ФГБОУ ВО «КНИТУ»*

*Таймаров М. А., д.т.н., профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «КГЭУ»*

Работа посвящена изучению физико-химических свойств сернистых мазутов, их элементного состава и способов подготовки к сжиганию, с целью снижения негативного воздействия выбросов энергетических предприятий на окружающую среду. С использованием теории подобия выявлено, что процесс испарения мазута определяется режимом движения одиночных капель, из которых состоит факел распыла. Полученные математические уравнения позволяют произвести расчет движения испаряющейся капли мазута, определить её размеры в зависимости от технологических параметров и скорости испарения.

**ISBN 978-83-66216-05-1**

© Р. Е. Липантьев,  
В. П. Тутубалина 2018  
© iScience Sp. z o. o.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА МАЗУТОВ</b> .....	6
1.1 Элементный и углеродный состав.....	6
1.2 Физико-химические характеристики мазутов.....	11
1.3 Способы подготовки топлива к сжиганию.....	14
<b>ГЛАВА 2. КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВА</b> .....	19
2.1 Пиролиз мазута.....	20
2.2 Газификация мазута.....	21
<b>ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	25
3.1 Исходный материал.....	25
3.2 Экспериментальная установка.....	25
3.3 Исследование гидродинамики дробления мазута на капли.....	27
<b>ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ КАПЛИ МАЗУТА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПРЕДТОПКЕ</b> ...	35
<b>ГЛАВА 5. КИНЕТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ МАЗУТА</b> .....	45
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	51
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	53

## ВВЕДЕНИЕ

В топливно-энергетическом балансе страны широко используется в качестве энергетического топлива мазут. Кроме того, мазут применяется для улучшения сжигания топлива пониженной тепловой ценности, для подсветки, факела и растопки котлов тепловых электрических станций.

Мазуты представляют собой сложные коллоидальные системы различных по конфигурации углеводородов, сернистых, азотистых и кислородосодержащих соединений. В некоторых мазутах содержится большое количество углеводородов парафинового ряда, высокое содержание которых снижает текучесть и повышает температуру их застывания. Такие мазуты характеризуются повышенной вязкостью и плотностью. Поэтому перед распыливанием в форсунках мазуты нагревают до температуры 100-160°C с целью снижения их вязкости.

В топочных мазутах содержится значительное количество асфальто-смолистых веществ и сераорганических соединений, а также находятся соединения ванадия и азота. Все выше перечисленные соединения ухудшают качественные топливные характеристики мазута. Так, асфальтно-смолистые вещества вызывают закоксовывание форсунок, повышение содержания сернистых соединений в мазуте приводит к интенсивному развитию низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева котлов, а в топках котлов в области высоких температур и недостаточных количествах кислорода воздуха возникает опасность высокотемпературной коррозии. Кроме того, при сжигании сернистых мазутов, в атмосферу с дымовыми газами выбрасывается огромное количество оксидов и диоксидов серы, оказывающих вредное влияние на животный и растительный мир.

Известно, что сера и азот входят в структуру сложных циклических гетероатомных соединений. При сжигании азотистых соединений в атмосферу выделяется диоксид азота. Соединения ванадия в мазутах представлены группами металлоорганических соединений. Содержание ванадия в мазуте не превышает 0,03 %. Характерно, что с увеличением

сернистости мазута увеличивается содержание в нем ванадия, который при сжигании переходит в оксиды, способствующие ванадиевой коррозии поверхностей нагрева котла. В этой связи от указанных соединений следует освобождать энергетические мазуты.

Эффективность сжигания мазута в топочных камерах энергетических котлов тепловых энергетических станций в значительной степени зависит от интенсивности дробления его на отдельные капли. Поскольку сжигание топлива в энергетических установках осуществляется в парообразном состоянии, то степень перехода его из жидкого состояния в парообразное определяется величиной его капли или степенью дробления топлива. Время пребывания топлива в камере сгорания котла составляет доли секунды, то есть химические реакции горения завершаются очень быстро и не оказывают существенного влияния на характеристики выгорания мазута.

Таким образом, основными процессами, определяющими горение мазута в топочных камерах энергетических установок, следует считать интенсивность дробления мазута, его испарение и смесеобразование с воздухом. В свою очередь смесеобразование определяется интенсивностью испарения мазута, так, как перемешивание концентраций в ядре факела осуществляется в паровой фазе, которая подвергается воздействию турбулентных пульсаций и различных возмущений потока. Следовательно, скорость перехода жидкой фазы мазута в паровую определяет эффективность смесеобразования и горения топлива.

## ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА МАЗУТОВ

### *1.1 Элементный и углеродный состав*

Мазуты представляют сложные коллоидальные системы углеводородов, некоторые из которых способны образовывать в области температур застывания квазикристаллические структуры, обладающие пониженной текучестью. Наиболее типичными представителями соединений, содержащихся в мазутах, являются углеводороды парафинового ряда, нециклического строения [1].

В связи с высоким содержанием в топочных мазутах парафиновых углеводородов и асфальто-смолистых веществ значительно повышается вязкость и плотность мазутов. Отличительной особенностью мазутов является высокое содержание в них ванадия, сернистых и азотистых соединений [1-3].

Элементный состав горючей части мазута близок к элементному составу нефти, а у мазута, с малым содержанием серы, он практически не отличается от состава нефти, которой мазут был получен. Преобладающим элементом является углерод (85-87 %), вторым водород (10-12 %) остальное приходится на долю серы, азота, кислорода и ванадия. Для высокосернистого крекинг-мазута характерным является пониженное содержание углерода и водорода при повышенном содержании ванадия и азота.

Теплота сгорания безводных мазутов различных марок практически одинакова и составляет 40000-42000 кДж/кг что является особенно важным при использовании их в качестве энергетического топлива для котлов тепловых электрических станций, поскольку такое ничтожное колебание теплоты сгорания жидкого топлива практически не оказывает влияния на КПД энергетического котла [1, 2].

Углеводородные соединения являются основным компонентом прямогонных мазутов. Причем в основном углеводороды ароматического и нафтенового ряда, а также полициклические углеводороды. Значительную долю

составляют ациклические углеводороды предельного ряда (парафины). Крекинг-мазуты содержат в основном полициклические углеводороды, а также углеводороды ряда этилена (олефины) [1-5].

Асфальто-смолистые вещества, содержащиеся в большем или меньшем количестве в каждой нефти, при ее перегонке, как наиболее высококипящие, переходят в мазут в основном без изменения своей структуры. Однако при крекинге прямогонного мазута большая их часть, разлагаясь, превращается в твердые продукты асфальто-смолистого характера: асфальтены, карбены и карбоиды [10].

Асфальтены являются продуктами окисления нейтральных смол, присутствующих в нефтях. По внешнему виду асфальтены твердые аморфные вещества темно-бурого или черного цвета, находящиеся в мазуте в коллоидальном состоянии [7-12].

Карбены являются более конденсированными веществами, чем асфальтены, и находятся в мазуте в твердом виде, характеризуются повышенным содержанием кислорода. Внешне от асфальтенов карбены отличаются более темной окраской. Карбоиды также содержатся в мазуте в твердом состоянии, структурно карбоиды являются наиболее конденсированными и науглероженными веществами [1, 12].

Агломераты карбоидов и асфальтенов, образующихся при коагуляции, могут вызывать закоксовывание форсунок. Содержание асфальто-смолистых веществ в мазуте в процессе их хранения непрерывно возрастает, вследствие протекания окислительных и других процессов [11].

Сернистые соединения в мазуте присутствуют в основном, в форме сераорганических компонентов и в меньшей мере в виде сероводорода и элементной серы. Содержание серы в мазуте находится в прямой связи с сернистостью нефти, из которой он был получен [10-12].

Нефти всех месторождений содержат серу в количестве от долей процента до 5-7 %, а в отдельных случаях и более. Подавляющая часть сернистых соединений (70-90 %) концентрируется в высококипящих фракциях нефти,



являющихся основной частью мазута. Поэтому даже при переработке малосернистых нефтей мазут, получаемый из них, характеризуется повышенным содержанием серы [6].

В принятой классификации сернистых соединений нефтей и нефтепродуктов различают следующие их основные группы: меркаптаны, сульфиды, дисульфиды, полисульфиды, тиофены, тиофаны. Однако значительная часть сернистых соединений остается неклассифицированной вследствие недостаточности знания об их молекулярном строении. При проведении анализов группового состава эту часть сернистых соединений относят к "неопределяемой" или "остаточной" сере. Кроме того, в нефтях обычно присутствуют сероводород и сера элементарная [6-8].

Меркаптаны представляют собой группу сернистых соединений, молекулы которых построены по типу  $RSH$ , где  $R$  – какой-либо углеводородный радикал циклического или ациклического характера. Содержание меркаптанной серы в нефтях и мазутах обычно невелико: от следов до 0,2-0,3 % (в случае высокосернистой нефти). Меркаптаны – легколетучие жидкости с сильным и неприятным запахом, плохо растворимым в воде. Из всех видов сераорганических соединений меркаптаны наиболее коррозионно-активны, особенно с малой молекулярной массой. Меркаптаны в мазуте поднимают его стабильность, усиливают смолообразование, повышают растворимость в топливе некоторых пластических материалов, придают ему неприятных запах. Распад меркаптанов приводит к резкому возрастанию количества образующих в топливе нерастворимых осадков [8, 9].

Дисульфиды и полисульфиды по своему строению представляют собой соединения с двумя и более атомами серы в молекулах ( $RSSR$ ). Содержание ди- и полисульфидов в нефтях в пересчете на серу находится в пределах от сотых долей до 0,2-0,3 %. От моносульфидов дисульфиды и в особенности полисульфиды отличаются меньшей термической и химической стабильностью. Их присутствие в топливе резко усиливает смолообразование. С ростом числа атомов серы в молекуле стабильность полисульфидов резко снижается, а химическая

активность возрастает [1-8].

Тиофаны и тиофены – циклические сераорганические соединения являются по существу циклическими разновидностями сульфидов. Тиофаны обладают относительно слабой коррозионной активностью, нерастворимы в воде, устойчивы к действию щелочей и щелочных металлов. От тиофана тиофены отличаются наличием двойных связей. Тиофен обладает повышенной реакционной способностью [6-9].

Элементарная сера содержится в сырых нефтях до 1 % и более как в аморфном, так и кристаллическом виде. Она весьма коррозионно-активна по отношению к цветным металлам и их сплавам. Однако на черные и легированные металлы элементарная сера действует лишь при температуре более 100 °С [9].

Сероводород, будучи газообразным при нормальных условиях, хорошо растворим в углеводородах и хуже в воде. Он принадлежит к числу коррозионно-активных сернистых соединений вызывающих разрушения цветных и черных металлов. На воздухе сероводород легко окисляется до элементарной серы. Особенностью сероводорода является весьма высокая токсичность [9-12].

"Остаточная" сера нефтей концентрируется в наиболее тяжелой, высокомолекулярной её части, главным образом в группе асфальто-смолистых соединений [9].

Таким образом, а прямогонном мазуте содержится в основном устойчивые высококипящие сераорганические соединения с преобладанием группы сульфидов, тиофенов и "остаточной" серы. Однако в нем могут встречаться и низкокипящие моносульфиды, меркаптаны, а также сероводород и элементарная сера. Большая часть этих разновидностей имеет вторичное происхождение [9, 10].

Присутствие серы в мазуте затрудняет его использование по ряду причин, как технического, так и экологического характера. Повышение сернистости мазута выше 0,3 % приводит к усиленной низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева котла в области экономайзера и воздухоподогревателя. Однако увеличение содержания серы в

мазуте ваше 1-1,5 % мало сказывается на коррозионной активности продуктов сгорания. При сжигании сернистого мазута при малых избытках воздуха возникает опасность высокотемпературной сероводородной коррозии в области нижней радиационной части котлов. Присутствие серы в мазуте ухудшает работу тракта подачи мазута, мазутных насосов и подогревателей. Однако наибольшие неприятности сера мазута доставляет окружающей среде, вследствие образования при сжигании сернистого мазута окислов серы, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами [12, 13].

Соединения ванадия в мазуте представлены к основному группами металлоорганического характера, в структуру которых входят наряду с атомами ванадия также атомы железа, никеля и других металлов. Содержание ванадия в мазуте обычно невелико и, как правило, не превышает 0,03%. При этом наблюдается рост содержания ванадия в мазуте с увеличением его сернистости. При сжигании мазута ванадий переходит в соответствующие оксиды, в свою очередь взаимодействующие с оксидами других элементов. Эти соединения в определенных условиях образуют агрегатные отложения на поверхностях нагрева мазутных котлов, под слоем которых могут активно протекать процессы коррозии металлов. Содержание ванадия в этих отложениях может достигать 50% и более [9].

В последнее время обращается внимание на содержание азота в жидком топливе. Азот входит в структуру так называемых гетероорганических соединений кольчатого вида. Массовая доля азота в мазутах колеблется от 0,1-1,5% [10].

Вода в мазутах обычно присутствует в пределах от 0,5-1 % до 3-5% , однако в отдельных случаях ее содержание может достигнуть 10-20 % и более. Значительное обводнение мазут происходит в основном при разогреве в период слива паром.

Вода в мазуте, если она достаточно хорошо перемешана с мазутом (до образования эмульсии), при умеренных её количества (2-3 %) интенсифицирует процесс сжигания тяжелого жидкого топлива. При большом содержании влаги в отсутствие эмульгирования усложняется эксплуатация мазутного хозяйства, что может привести к расстройству

режима горения из-за возможного образования водных пробок, перекрывающих равномерную подачу топлива к форсункам.

Минеральные примеси в мазутах представляют собой в основном соли щелочных металлов, растворенные в воде. В мазут попадают также продукты коррозии резервуаров, в которых он хранится. При сжигании мазута минеральные примеси трансформируются в оксиды, образующие большую или меньшую часть его золы. Другая часть зоны образуется при сжигании металлоорганических соединений, входящих непосредственно в состав горючей массы мазута [12-15].

Зольность топочных мазутов весьма незначительна и обычно не превышает 0,2 %. Зольность увеличивается с углублением отбора из нефти легких малозольных фракций [9].

Механические примеси в мазуте представляют собой в основном инертные включения, попавшие в нефть во время ее добычи. Содержание их в мазуте колеблется в широких пределах: от сотых долей до целых процентов. Присутствие механических примесей в мазуте может оказать влияние на работу топочно-горелочных устройств, особенно расплывающихся элементов форсунок [15].

### ***1.2 Физико-химические характеристики мазутов***

Свойства мазутов, в определяющей степени зависят от характеристики нефтей, из которых они были получены, а также от способа и глубины переработки этих нефтей [10, 11].

Одним из важнейших показателей является вязкость, которая входит в марку мазута. Именно вязкостью определяются способы и длительность сливных и наливных операций, условия транспортировки топлива и эффективность работы форсунок. Вязкость влияет на скорость осаждения механических примесей и полноту отстаивания его от воды [13].

В практике подготовки мазута к сжиганию предпочитают пользоваться условной величиной вязкости – отношением времени истечения определенного объема мазута (200 мл) при заданной температуре ко времени истечения такого же объема дистиллированной воды в вискозиметре стандартных

размеров (конструкции Энглера). Для определения вязкости высоковязких марок мазута применяют также шариковый вискозиметр Гепплера. В нем изменение вязкости основано на определении времени движения шарика, катающегося внутри наклонной трубки, заполненной исследуемым продуктом [13, 10].

Наиболее существенным фактором влияющим на вязкость является температура. Зависимость кинематической вязкости мазута от температуры приближение описывается уравнением Вальтера:

$$\lg \lg(V \cdot 10^{-8} + 0,8) = A + B \cdot \lg T$$

где  $V$  - кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$A$  и  $B$  - коэффициенты;

$T$  - температура,  $\text{К}$ .

С повышением температуры, различия в вязкости маловязких и высоковязких мазутов, а также крекинг-остатков, быстро уменьшаются. На вязкость оказывает влияние давление. С ростом давления вязкость мазута увеличивается [1, 2, 10].

Вязкостные свойства существенно влияют на работу форсунок при сжигании мазута. С увеличением вязкости производительность форсунок малой мощности заметно увеличивается, средней - почти не меняется, а большой - снижается. С увеличением вязкости ухудшается тонкость распыливания мазута, что может привести к повышению недожога топлива [14, 15]. Плотность мазута, в зависимости от марки, колеблется в широких пределах. В относительном выражении (по сравнению с плотностью воды при температуре  $4^\circ\text{C}$ ) плотность мазута колеблется от 0,95 для легких мазутов до 1,06 для тяжелых крекинг-остатков. Эти колебания относительно плотности оказывают существенное влияние на отстой мазута от влаги и механических примесей и на работу форсунок. При относительной близости плотности мазута к единице усложняется процесс отстоя его от влаги, а при значениях её 0,98-1,01 отстой за сравнительно короткое время (100-200 ч) практически невозможен. При большей плотности

(около 1,05) мазут располагается в резервуарах ниже слоя воды, что полностью исключает возможность его отстоя [9, 10, 11].

От значения поверхностного натяжения в определенной мере зависит эффективность распыливания жидкого топлива. Поверхностное натяжение связано с вязкостью мазутов. Его значение понижается с уменьшением их начальной вязкости [9, 10, 12].

Мазут, как любой нефтепродукт, не имеет строго фиксированной температуры застывания. За максимальную температуру застывания принимают такую температуру, при которой мазут загустевает настолько, что при наклоне пробирки под углом  $45^{\circ}$  уровень его остается неподвижным в течение 1 мин. Температура застывания мазутов повышается с ростом содержания асфальтенов и повышается при наличии в жидком топливе смолистых веществ, задерживающих кристаллизацию твердых углеводородов (парафинов) [1, 2, 3, 10].

Температура вспышки, как и температура воспламенения мазута, позволяет судить о составе и качестве жидкого топлива. Определение температуры вспышке проводится для установления максимальной температуры подогрева в ёмкостях, не изолированных от окружающего воздуха. По соображениям пожарной безопасности эта температура должна быть не менее чем на  $10^{\circ}\text{C}$  ниже температуры воспламенения мазута.

Температурой воспламенения мазута называется температура его нагрева, при которой выделяющиеся из мазута пары в смеси их с окружающим воздухом вспыхивают при поднесении к ним пламени и вслед за вспышкой начинает гореть само топливо [10].

Прямогонные мазуты, не содержащие парафинов, имеют температуру вспышки в пределах  $135\text{-}234^{\circ}\text{C}$ , а содержащие парафины около  $60^{\circ}\text{C}$ . Температура вспышки высоковязких крекинг-остатков  $185\text{-}243^{\circ}\text{C}$ . Температура воспламенения жидкого топлива превышает температуру вспышки, но обычно ненамного, не более  $60\text{-}70^{\circ}\text{C}$  [10].

Значительно выше температура самовоспламенения жидкого топлива, определяемая как температура, при которой

топливо воспламеняется в отсутствии открытого пламени. Для мазута она находится в пределах 500-600 °С [10]. Теплоемкость, и теплопроводность - это наиболее значимые из теплофизических свойств мазута при их подготовке и сжигании. Теплоемкость может быть определена по формуле [1-3, 10]

$$C=1738 - 2,5t$$

Теплопроводность мазутов при стандартных условиях находится в пределах 0,16-0,12 Вт/(м·К) в зависимости от их плотности. С ростом температуры теплопроводность жидкого топлива снижается по линейному закону.

### ***1.3 Способы подготовки топлива к сжиганию***

Подготовка мазута к сжиганию состоит из ряда последовательных технологических операции: грубой очистки от механических примесей при сливе мазута из цистерн, подогреве и обработке присадками, тонкой очистке от механической примесей, карбонидов и карбенов. Иногда подготовка мазута к сжиганию может быть дополнена его гомогенизацией, диспергированием влаги (в случае обводнения мазута), если влага не отделяется отстаиванием [16-17].

Типовая схема топливоподачи предусматривает подачу мазута к котлам в две ступени. Низконапорные насосы подъема обеспечивают циркуляционный подогрев мазута в резервуарах и подачу его к высоконапорным насосам II подъема. На линии между насосами I и II подъема установлены подогреватели мазута и фильтры. При такой схеме подогреватели мазута и фильтры для его очистки находятся под давлением низконапорных насосов I подъема, что упрощает их конструкцию и эксплуатацию. Существенно сокращается также суммарный расход электроэнергии на привод насосов, так как насосы II подъема работают на мазуте с пониженной вязкостью.

Вместе с тем двухступенчатая схема подачи мазута с повышенным давлением его перед форсунками (до  $45 \cdot 10^5$  Па) сложнее одноступенчатой, менее надежна и требует более квалифицированного обслуживания.

Схемы топливоподготовки для производственных и отопительных котельных также предусматривают циркуляционный подогрев мазута в резервуарах, фильтрационную очистку и подогрев его перед распыливанием. К форсункам мазут подается обычно по циркуляционной схеме трубопроводов.

Подогрев мазута необходим для лучшего осуществления всех операций по подготовке его к сжиганию. При подогреве снижается вязкость мазута, что улучшает его прокачиваемость, повышается его однородность, облегчается обработка мазута присадками, обеспечивается более совершенный распыл его в топочной камере. При подогреве мазута до высоких температур происходит частичное испарение низкокипящих фракции, что при определенных условиях улучшает условия его сжигания [14-16].

Подогрев мазута осуществляется на разных стадиях его подготовки при сливе из цистерн, в которых он подается на электростанцию или котельную, в резервуарах, где он хранится и откуда подается к котлам, на линии подачи к форсункам. Во всех этих случаях подогрев мазута осуществляется с помощью подогревателей различного вида и конструкций. Для подогрева мазута в резервуарах используются, как подогреватели погруженного типа, змеевиковые или секционные, устанавливаемые в нижней части резервуара, так и выностные подогреватели, работающие по схеме циркуляционного подогрева резервуар - насос - выностной мазутный подогреватель - резервуар.

В энергетике наиболее широкое распространение получили следующие типы высокопроизводительных мазутных подогревателей (МП) [18-22]:

а) Подогреватели с плавающей головкой, выполняющей роль греющего элемента. Для подогрева мазута используют пар давлением 1,0-1,3 МПа и температурой 200 °С. Подогреватели компактны, имеют относительно низкую металлоемкость, применяются для подогрева мазута марок М100 и М200. Недостатками этого типа мазутных подогревателей являются быстрая загрязняемость со стороны топлива, невысокий



коэффициент теплопередачи, возможность попадания мазута в греющий пар из-за неплотностей в плавающей головке.

б) Подогреватели секционные типа «труба в трубе» (ТвТ). Подогреватель этого типа состоит из горизонтально расположенных элементов, каждый из которых является линейным однострунным теплообменником типа «труба в трубе». Мазут движется по внутренней трубе, а греющий пар по кольцевому пространству, образованному внутренней и наружной трубами; элементы секции соединены между собой калачами из труб. Нагревательные элементы сгруппированы в две параллельные секции. Мазут поступает со скоростью 1,2-1,5 м/с в каждую секцию теплообменника через нижний распределительный коллектор и отводится из подогревателя через верхний коллектор. Теплообменник включен по принципу противотока, в соответствии с которой пар проходит все элементы [18-20]. Благодаря своей конструкции подогреватели типа «труба в трубе» имеют более высокий коэффициент теплопередачи, но из всех применяемых в энергетике типов являются наиболее металлоемкими.

в) Секционные подогреватели ПКБ. Основным элементом этих подогревателей является секция в виде трубчатого подогревателя. Подогреватель комплектуется из 16 - 25 секций, последовательно соединенных между собой калачами, обеспечивающими перемешивание между отдельными слоями мазута. Мазут движется по трубному пучку со скоростью 1,7 м/с, пар - в межтрубном пространстве. Давление пара  $8 \cdot 10^5$  Па. В каждой из секции обеспечивается противоточное движение пара и мазута. Подогреватель наряду с высокими технико-экономическими показателями характеризуется достаточной эксплуатационной надежностью [19, 21].

г) Подогреватель - трубопровод конструкции ПКБ. Подогреватели этого типа отличаются от секционных тем, что нагревательные элементы (секции) не собираются в группы, а укладываются в линию вместо мазутопровода. В конструкции объединены два теплообменных аппарата - поверхностный (в секциях) и смешения (в камерах). Преимуществом этого

подогревателя является то, что он одновременно служит для транспорта и подогрева мазута, вследствие чего сокращаются затраты металла, арматуры, строительных и монтажных работ, упрощается схема мазутного хозяйства [22].

Циркуляционный подогрев мазута заключается в том, что топливо отбирается из нижней части резервуара и насосом прокачивается через внешний подогреватель. Подогретое во внешнем подогревателе топливо по напорному трубопроводу через насадки сбрасывается в нижнюю часть резервуара к центру сечения или в сторону противоположную отводу топлива. Растекающиеся в резервуаре турбулентные свободно затопленные струи и сопутствующие им вихревые токи создают эффективное перемешивание топлива, обеспечивают его однородность и препятствуют осаждению карбенов [19, 20, 22].

При циркуляционном подогреве полностью используется полезный объем ёмкости и исключается обводнение топлива. Включение в циркуляционную схему внешнего теплообменника с вынужденным движением топлива может обеспечить при соответствующем выборе оборудования более эффективный теплообмен, чем в погруженных поверхностных подогревателях при естественной конвекции. В этом случае может быть сокращено время и повышена температура подогрева мазута. При циркуляционном подогреве внешний подогреватель и насос могут обслужить группу резервуаров [16, 17, 20]. Исследования процесса теплообмена при циркуляционном подогреве показали, что подобный подогрев обеспечивает однородность температурных полей и полей концентраций в резервуаре.

Подогрев мазута перед распыливанием осуществляется непосредственно на линии подачи его к форсункам. Целью подобного подогрева является не только не только лучшее распыливание мазута, достигаемое при определенных значениях его вязкости, но и соответствующая тепловая подготовка мазута к воспламенению. Благодаря подогреву капли мазута в момент их выброса из форсунки окутаны парами топлива и при интенсивном смешении с дутьевым воздухом воспламеняются

практически у корня факела, чем обеспечивается быстрое их сжигание с минимальным механическим недожогом [21, 22].

Для подогрева мазута перед форсунками до обычно принятых температур, не превышающих 135-150 °С, используются подогреватели различных конструкции; трубчатые нормального ряда или с плавающей головкой, секционные теплообменники ТвТ, подогреватели конструкции ПКБ и др. Для подогрева мазута, в том числе и высоковязкого используется пар с давлением до  $10 \cdot 10^5$  Па и температурой до 200 °С [20].

Высокотемпературный подогрев мазута на линии подачи его к форсункам можно осуществлять как в одну, так и две ступени. Двухступенчатый подогрев более целесообразен в случае предварительной обработки мазута присадками, проводимом обычно при температуре 60-70 °С [17-22].

## ГЛАВА 2. КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВА

Повышение эффективности использования органического топлива является одной из важнейших задач энергетики и экономики страны, поскольку свыше 40 % материальных затрат связано с топливно-экономическим комплексом, а эффективность использования топлива на электростанциях до настоящего времени остается низкой и составляет менее 40 %.

При этом из-за отсутствия крупных энерготехнологических комплексов нерациональное потребление топлива и его перерасход являются неизбежным явлением. В результате несовершенства топочных процессов происходит частичная потеря летучих веществ, которые могли бы быть использованы для получения ценных горючих газов с высокой теплотой сгорания и жидких смолистых продуктов, являющимися заменителями нефти [27, 28].

Решение поставленных задач, связанных с повышением энергетической эффективности использования органического топлива при одновременном получении ценного сырья для технологической и нефтехимической промышленности, принципиально возможно в результате создания новых технологий использования топлива, основанных на методах деструктивной и высокотемпературной обработки топлива.

Новый подход использования топлива в энергетике обеспечивает отбор наиболее ценных продуктов для получения тепловой и электрической энергии. При этом энергетический процесс, заключающийся в сжигании части топлива в топках энергетических котлов, является составной частью комбинируемого энерготехнологического комплекса и при этом обеспечивает высокую интенсификацию технологического производства.

В результате предложенных мероприятий сократится расход топлива на единицу вырабатываемой продукции, снизятся капитальные затраты на ввод дополнительных мощностей для производства энерготеплоносителя и ценных

продуктов органического синтеза в комбинированном энергетическом и технологическом процессе. При этом суммарный коэффициент полезного действия (КПД), который учитывает технологическую и энергетическую эффективность использования топлива составит 90-92 %, что способствует увеличению экономии топлива.

Комплексный энерготехнологический метод позволяет эффективно использовать низкосортные сорта топлива, например, высокосернистый мазут для получения тепловой энергии, горючих газов, смолистых продуктов и редких металлов с обеспечением охраны окружающей среды от вредных выбросов.

Организация энергокомплексов целесообразна на базе крупных потребителей топлива, то есть электростанций, металлургических и нефтеперерабатывающих заводах.

### ***2.1 Пиролиз мазута***

Для повышения эффективности сжигания жидкого топлива (мазута) используют его подогрев или присадки. В данный момент разработано и применяется несколько видов жидких и твердых растворимых в воде присадок, в частности группа присадок ВНИИНП, присадка ВТИ-4ст, минеральная присадка на алюмосиликатной основе и другие виды присадок [27].

Ввод присадок в процессе подготовки мазута к сжиганию способствует улучшению его прокачиваемости, распыливаемости, повышает полноту сгорания топлива. Однако, в этом случае проблема защиты окружающей среды от вредных выбросов не решается.

Эту проблему, с одновременным использованием минеральной части для получения ценных продуктов, можно решить с применением высокотемпературной физико-химической подготовки топлива. В процессе этой подготовки применяется глубокая или полная деструкция углеводов, сопровождающаяся разложением органической части топлива и образованием новых органических газообразных продуктов.

Глубокая деструкция топлива достигается в результате пиролиза, протекающего при нагреве топлива до высоких температур без доступа кислорода. В этом случае происходит разложение органического топлива с образованием парогазообразных продуктов – летучих веществ и смолистых продуктов [27, 28]

Газообразная часть летучих веществ состоит из углеводородных газов, водорода ( $H_2$ ), оксида углерода ( $CO$ ), диоксид углерода ( $CO_2$ ), сероводорода ( $H_2S$ ), и других веществ [27].

## ***2.2 Газификация мазута***

С целью улучшения процесса горения, снижения вредных выбросов в атмосферу целесообразно использовать процесс газификация мазута, который протекает при недостаточном количестве кислорода воздуха.

Полная деструкции топлива достигается при его газификации, протекающей при частичном сгорании топлива, с получением высоких температур [27]. В этом случае вся органическая часть топлива превращается в горючий газ, который после очистки от сернистых соединений может быть использован, как чистое органическое топливо.

Для ТЭС, работающих по энергетической схеме использования топлива, этот метод является одним из эффективных способов термической подготовки топлива [28].

Процесс газификация близок к процессу горения топлива. Если горение – это окисление при достаточном количестве кислорода ( $\alpha > 1$ ), то газификация – окисление при недостатке кислорода ( $\alpha < 1$ ).

Таким образом, оба процесса имеют единую химическую основу – химическое соединение горючих компонентов кислородом воздуха.

Однако между этими процессами есть различия, главным из которых является направление использования потенциальной химической теплоты топлива. При отсутствии потерь теплоты в процессе окисления топлива независимо от

коэффициента потребления кислорода ( $\alpha$ ) его потенциальной теплота  $Q_T$  (теплота сгорания) распределяется между физической  $Q_\phi$  и химической  $Q_x$  теплотой продуктов горения

$$Q_T = Q_\phi + Q_x$$

откуда

$$I = \frac{Q_\phi}{Q_m} + \frac{Q_x}{Q_m}$$

Обозначив

$$\frac{Q_\phi}{Q_m} = \varphi, \quad \text{а} \quad \frac{Q_x}{Q_m} = \eta_{газ}$$

получим  $\varphi + \eta_{газ} = 1$

Величина  $\varphi$ - степень полноты тепловыделения топлива.

Величина  $\eta_{газ}$ - степень газификации топлива.

При организации процесса горения стремятся максимально превратить теплоту топлива в физическую теплоту газа, тогда

$$Q_x = Q_\phi \quad Q = 0$$

$$\eta_{газ} = 0 \quad \varphi = 1$$

При газификации топлива стремятся получить горючий газ с максимальным превращением теплоты топлива в химическую теплоту газа

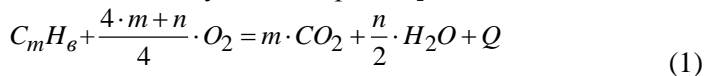
$$Q_T = Q_x \quad Q_\phi = 0$$

$$\eta_{газ} = 1 \quad \varphi = 0$$

Газификация мазута протекает с образованием  $CO$ ,  $CO_2$  и  $H_2$ . При этом процесс сопровождается термическим разложением жидких углеводородов с образованием свободного углерода (сажи), углеводородных газов и водорода [27, 28].

В качестве дутья при газификации мазута применяют воздух, водяной пар, паровоздушную смесь, обогащенную и не обогащенную кислородом  $O_2$ , двуокись углерода и пары кислородную смесь.

Газификация мазута кислородом  $O_2$  и водяным паром может быть описана следующим образом [27, 28]:



$$C_m H_\beta + \frac{m}{2} \cdot O_2 = m \cdot CO + \frac{n}{2} \cdot H_2 + Q \quad (2)$$

$$C_m H_\beta + m \cdot H_2O = m \cdot CO + \frac{2 \cdot m + n}{2} \cdot H_2 - Q \quad (3)$$

$$C_m H_\beta \rightarrow m \cdot C + \frac{n}{2} \cdot H_2 - Q \quad (4)$$

Процесс протекает при  $t=1000^\circ\text{C}$  и завершается выделением значительных количеств сажи, метана и его галогенов. Реакции (1)-(4) являются термическим распадом высокомолекулярных соединений мазута на оксиды углерода и водород.

Равновесный состав газа зависит от технологических режимов протекания процесса газификация мазута, то есть от температуры и давления.

## ВЫВОДЫ

Обзор отечественной и зарубежной литературы, посвященный процессам подготовки органического топлива к сжиганию в топках энергетических котлов на тепловых электрических станциях, показал, что проблемы разработки и внедрения новых энерготехнологических процессов эффективного использования топлива в народном хозяйстве является наиболее актуальной.

При комплексном энерготехнологическом использовании топлива обеспечивается минимальный удельный расход топлива на единицу вырабатываемой энергии, снижаются затраты общественно труда, увеличиваются мощность предприятия и коэффициент полезного действия, а также снижаются негативные воздействия вредных для человека токсичных выбросов типовых электрических станций на окружающую среду.

В настоящее время к технике сжигания высокосернистых мазутов на тепловых электрических станциях предъявляются жёсткие требования в вопросах повышения экономичности сжигания энергетического топлива и



уменьшению вредных выбросов, загрязняющих биосферу. Наиболее полно этим требованиям отвечает энерготехнологический метод использования органического топлива, основанный на высокотемпературной, деструктивной переработке топлива, который обеспечивает отбор ценных продуктов в виде горючего газа, смолопродуктов, пластификаторов, строительных материалов, редких металлов, серы и серосодержащих лекарственных веществ при частичном сжигании топлива для производства электротеплоносителя, используемого в энергетических и технологических процессах.

Данная технологическая схема использования органического топлива представляет особой интерес в связи с наметившейся тенденцией добычи и переработки высокосернистых нефтей, позволяющих получать мазуты содержанием сернистых более 3,5 %. Сжигание мазутов с высоким содержанием сернистых соединений способствует образованию оксидов и диоксидов серы, загрязняющих атмосферу.

Очистка мазутов от сернистых соединений в настоящее время изучена недостаточно хорошо и требует серьезного научного исследования. Решение поставленной задачи невозможно без выполнения научных исследований в области разработки рациональной технологической схемы обессеривания мазута перед сжиганием в топках энергетических котлов тепловых электрических станций. Комплексная технологическая подготовка топлива к сжиганию обеспечивает высокую эффективность и надёжность работы электрической станции без загрязнения окружающей среды токсичными оксидами и диоксидами серы.

## ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1 Исходный материал

В качестве объекта исследования использован мазут марки М100 прямогонной перегонки из Ромашкинской нефти с температурой кипения 340-390 °С. Физико-химические характеристики мазута приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Физико-химические характеристики мазута

Наименование показателя	Значение показателя
Кинематическая вязкость при 80°С, м <sup>2</sup> ·с	13,85·10 <sup>-6</sup>
Содержание серы, %	2,4
Зольность, %	0,6
Температуры вспышки, °С	142
Температура застывания, °С	10,9
Плотность при 80°С, кг/м <sup>3</sup>	909,92

### 3.2 Экспериментальная установка

Применяемые в настоящее время на тепловых электрических станциях методы физической подготовки жидкого топлива, его подогрев и обработка присадками, предназначены главным образом для повышения эффективности его сжигания в топках котлов тепловых электрических станций. Вместе с тем важные задачи, связанные с охраной окружающей среды от вредных выбросов, получением ценных химических продуктов, эффективным использованием минеральной части топлива, при использовании данных методов топливоподготовки не решаются.

Решение поставленной проблемы может быть достигнуто только при высокотемпературной физико-химической подготовке топлива, в процессе которой осуществляется глубокая или полная деструкция органического топлива, протекающая с разложением и трансформацией его органической части и образованием новых органических

продуктов – газообразных, жидких или твёрдых. Глубокая деструкция достигается при пиролизе или газификации.

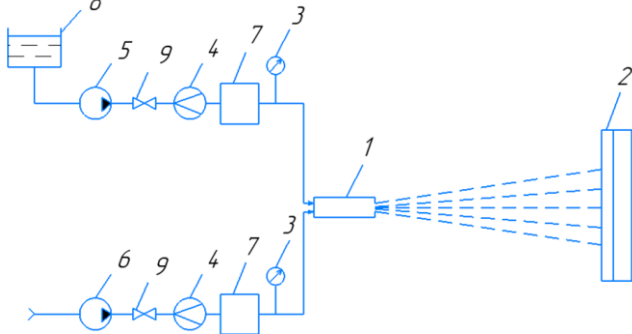


Рис. 3.1 Технологическая схема термической подготовки сернистого мазута

1 – форсунка; 2 – экран; 3 – манометр; 4 – расходомер; 5 – насос;  
 6 – насос; 7 – калорифер; 8 – топливный бачок; 9 – запорная арматура

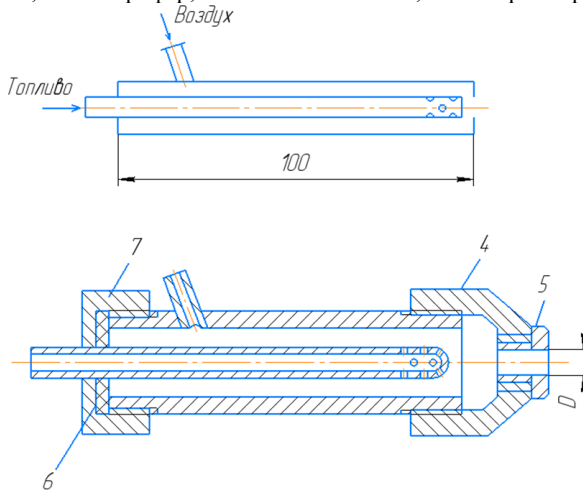


Рис. 3.2 Форсунка

1 – трубка внутренняя с боковыми отверстиями из заглушенным концом;  
 2 – трубка наружная; 3 – патрубок; 4 – наконечник; 5 – сопло; 6 – прокладка;  
 7 – гайка

Для тепловых электрических станций, работающих по энергетической схеме использования топлива, наиболее

эффективным методом термической подготовки топлива является его газификация.

Технологическая схема термической подготовки сернистого мазута приведена на рис. 3.1. Схема форсунки представлена на рис. 3.2.

### ***3.3 Исследование гидродинамики дробления мазута на капли***

Процесс дробления мазута в форсунках на капли очень сложен, поэтому тонкость распыливания в основном может быть установлена в результате длительных экспериментальных исследований.

Эффективность работы форсунок во многом определяется закономерностями разбрызгивания жидкости (мазута). Поэтому изучение процессов дробления является важным и необходимым для правильного эффективного использования топочных форсунок в энергетических котлах тепловых электростанций, а также для осуществления процесса десульфирования сернистых топлив.

Для изучения процесса разбрызгивания мазута были проведены эксперименты на установке, схема которой представлена на рис. 3.1.

На стендовой установке, оборудованной форсунками с диаметрами отверстия 2,3,4, 6 мм, подвергался дроблению мазут марки М100. Мазут из топливного бачка (8) насосом (5) подавался форсунку (1). Распыливание мазута осуществлялось воздухом при помощи насоса (6). Нагрев мазута и воздуха в форсунку осуществлялся в калориферах (7) до температуры 100 °С, а их расход измерялся цифровым расходомером (4). Скорость подачи мазута и воздуха в форсунку регулировалась с помощью запорной арматуры (вентилей). Разбрызгиваемая жидкость улавливалась в чаши-сборники, установленные на горизонтальной доске (2) с делениями через 0,1 м друг от друга по факелу распыла.

Распыл капель фотографировался и по полученным негативам подсчитывался средний диаметр капли по каждой

форсунке и по опыту в целом. Обработка экспериментальных данных производилась в критериальном виде.

Диаметр капли дробленого мазута можно выразить в виде функциональной зависимости

$$d=f(D, Q, W, B, q, \delta) \quad (3.1)$$

где  $d$  – диаметр отверстия дробленого мазута, м

$D$ - диаметр отверстия форсунки, м

$W$ - начальная скорость распыливающего агента, м/с

$B$ - расход распыливающего агента, м<sup>3</sup>/с

$Q$ - расход мазута, м<sup>3</sup>/с

$q$ - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>

$\delta$ - толщина мазутной струи, м

Из уравнения (3.1) методом анализа размерностей [23-26] можно получить обобщенную зависимость

$$\frac{d}{D} = A \cdot \left( \frac{Q \cdot W^2}{B \cdot q \cdot D} \right)^b \cdot \left( \frac{\delta}{D} \right)^c \quad (3.2)$$

обозначим

$$\frac{d}{D} = K, \quad \frac{Q \cdot W^2}{B \cdot q \cdot D} = \Pi, \quad \frac{\delta}{D} = \Gamma,$$

тогда уравнение (3.2) примет следующий вид

$$K = A \cdot \Pi^b \cdot \Gamma^c \quad (3.3)$$

В результате обработки экспериментальных данных по уравнению (3.3) получили зависимость

$$K = 283 \cdot \Pi^{0,12} \cdot \Gamma^{0,33} \quad (3.4)$$

Зависимость коэффициентов в уравнении (3.3) оценивалась при помощи критерия Стьюдента, а адекватность модели процессу дробления мазута критерием Фишера в результате регрессионного анализа многофакторного эксперимента, выполненн.

Экспериментальные исследования проводились при температуре 100 °С, расходе мазута от 0,8 см<sup>3</sup>/с до 11,6 см<sup>3</sup>/с, воздух от 0,9 см<sup>3</sup>/с до 11,7 см<sup>3</sup>/с.

Полученная критериальная зависимость (3.4) позволяет

определить диаметр каплей в зависимости от выше перечисленных факторов без проведения эксперимента. Критериальная зависимость учитывает влияние кинематической вязкости, плотности, расхода мазута и воздуха на размер, образующихся при дроблении мазута в форсунках в зависимости от диаметра отверстий в них.

В таблицах 1-4 приложения 1. приведены расчётные и экспериментально определенные диаметры каплей мазута.

Анализ данных таблиц показывает высокую сходимость расчётных и экспериментально полученных диаметров каплей мазута (не более 10-12 %), указать на применимость критериального уравнения (3.4) для расчета диаметра каплей мазута.

Сопоставление экспериментальных диаметров капли мазута с расчётными, вычисленными по критериальному уравнению (3.4) в зависимости от расхода воздуха показано на рис. 3.3.

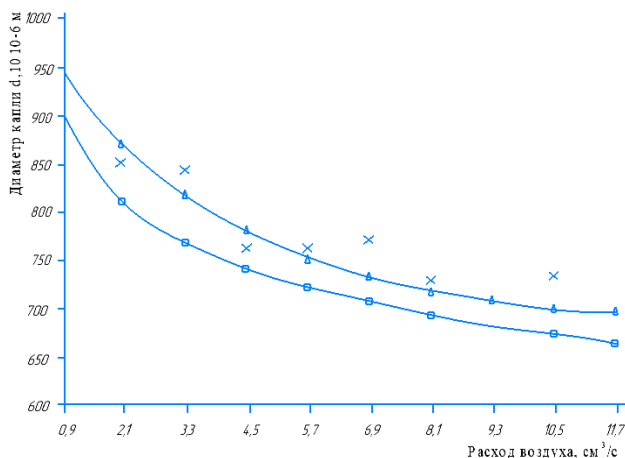


Рис. 3.3 Сопоставление вычисленных и экспериментальных диаметров каплей мазута в зависимости от расхода воздуха при расходе мазута  $Q_{\text{маз}}=0,8 \text{ см}^3/\text{с}$  и диаметре отверстия форсунки  $D=0,002 \text{ м}$

Δ - численные значения диаметра каплей мазута, полученные экспериментально.

◻ - численные значения диаметра каплей мазута, определенные расчетным методом по критериальному уравнению (3.4)

Из рис. 3.3 следует, что диаметры капель мазут, полученные в экспериментальным и расчетным путем, имеют отличие не более, чем на 10%. Это указывает на применимость полученного нами критериального уравнения для расчёта диаметра капель без проведения трудоемких экспериментов.

Анализ данных рис. 3.3 показывает, что с увеличением расхода воздуха на распыливание мазута, диаметр капель уменьшается. Так, например, при расходе воздуха равном  $2,1 \text{ см}^3/\text{с}$  диаметр капель равен  $751,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , а при расходе воздуха -  $5,7 \text{ см}^3/\text{с}$  диаметр капли мазута уменьшается до  $759 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Таким образом, для уменьшения диаметра капли распыливаемого мазута, следует увеличивать расход воздуха. Однако увеличение количества распыливающего воздуха свыше  $5,7 \text{ см}^3/\text{с}$  нецелесообразно, поскольку повышение количества воздуха в 2,1 раза приводит к снижению диаметра капли распыливаемого мазута в 1,1 раза. Поэтому оптимальный расход воздуха составляет  $4,5\text{-}5,7 \text{ см}^3/\text{с}$ , так как в этом случае с повышением расхода воздуха диаметр капли снижается в 1,25 раза.

Сопоставление вычисленных и экспериментальных диаметров капель мазута в зависимости от расхода мазута приведена на рис. 3.4.

Из рис. 3.4 следует, что с увеличением расхода мазута диаметр капель возрастает. Так, при расходе мазута равном  $0,8 \text{ см}^3/\text{с}$  диаметр капли имеет величину  $945 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , а с повышением расхода мазута до  $11,6 \text{ см}^3/\text{с}$  диаметр капли возрастает до  $1293 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , то есть в 1,37 раза, а увеличение подаваемого мазута от  $2 \text{ см}^3/\text{с}$  до  $5,6 \text{ см}^3/\text{с}$  приводит к повышению диаметра капли в 1,1 раза. Следовательно, с целью снижения диаметра капли мазута следует уменьшать количество распыливаемого мазута. Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными, полученными по уравнению (3.4). Различие между экспериментальным и расчетными данными составляет не более 7 %. Удовлетворительная корреляция экспериментальных и расчетных данных указывает на

применимость уравнения (3.4) при расчете диаметра капли в зависимости от его расхода.

На рис. 3.5 приведены расчетные и экспериментальные данные диаметра капли в зависимости от величины диаметра отверстия форсунки.

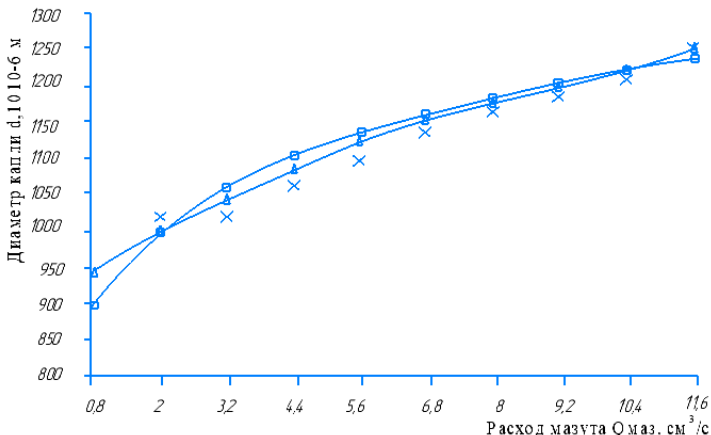


Рис. 3.4 Сопоставление вычисленных и экспериментальных диаметров капель мазута в зависимости от расхода мазута при расходе воздуха  $Q_{\text{возд}}=0,9 \text{ см}^3/\text{с}$  и диаметре отверстия форсунки  $D=0,002 \text{ м}$

$\Delta$  - численные значения диаметра капель мазута, полученные экспериментально.

$\square$  - численные значения диаметра капель мазута, определенные расчетным методом по критериальному уравнению (3.4)

Анализ данных рис. 3.5 показывает удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчётных значений диаметров капель мазута в зависимости от диаметра отверстия форсунки.

Относительная ошибка в определении диаметра капель экспериментальным расчётным путём составляет не более 9 %, что указывает на применимость критериального уравнения (3.4) для расчёта диаметра капель мазута в зависимости от величины диаметра отверстия форсунки.



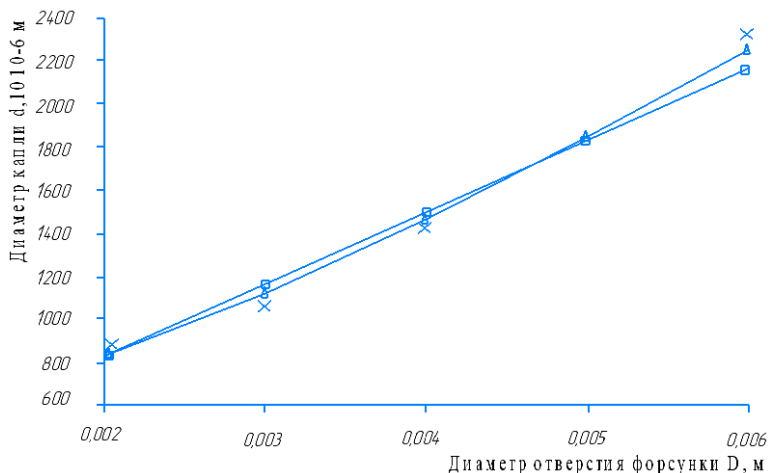


Рис. 3.5 Сопоставление вычисленных и экспериментальных диаметров каплей мазута в зависимости от диаметра отверстий форсунки при расходе воздуха  $Q_{\text{возд}}=4,5 \text{ см}^3/\text{с}$  и расходе мазута  $Q_{\text{маз}}=2,0 \text{ см}^3/\text{с}$

Δ - численные значения диаметра каплей мазута, полученные экспериментально.

x - численные значения диаметра каплей мазута, определенные расчетным методом по критериальному уравнению (3.4)

Из рис. 3.5 следует, что с увеличением диаметра отверстия форсунки от 0,002 м до 0,004 м диаметр капли мазута повышается от  $881,4 \cdot 10^{-6}$  м и до  $1444 \cdot 10^{-6}$  м, то есть в 1,64 раза, а увеличение диаметра отверстия от 0,002 м до 0,006 м приводит к повышению диаметра капли мазута от  $881,4 \cdot 10^{-6}$  м до  $2350 \cdot 10^{-6}$  м, то есть в 2,67 раза.

Анализ данных рис. 3.5 показывает, что диаметр капли распыливаемого мазута увеличивается пропорционально диаметру отверстия форсунки. Таким образом, увеличение диаметром отверстий приводит к повышению размера капель мазута. Поэтому для получения максимальной тонкости распыла следует снизить диаметр отверстия до минимальных размеров.

Сопоставление экспериментальных и расчёт данных приведены на рис. 3.6.

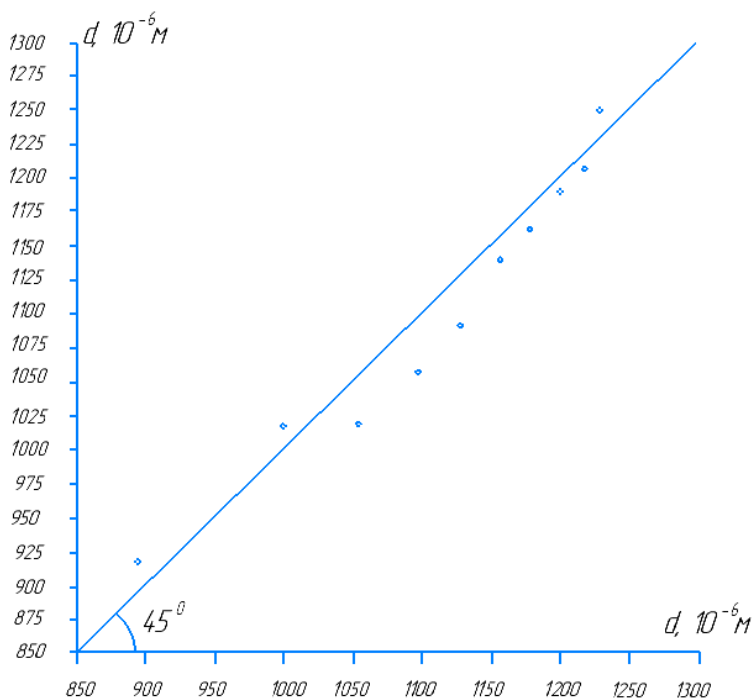


Рис. 3.6 Сопоставление экспериментальных и расчётных значений диаметра капель мазута

Из рис. 3.6 следует, что экспериментальные и расчётные данные, полученные по критериальному уравнению (3.4), имеют удовлетворительную корреляцию.

Относительная ошибка при сравнительном анализе диаметра капель полученных экспериментальным путём и по уравнению (3.4) не превышает 8-10%.

Это обстоятельство позволяет использовать выведенную нами критериальную зависимость для расчёта диаметра капель распыляемого мазута в зависимости от технологических режимов распыливания мазута, то есть от количества воздуха, мазута и диаметра отверстия форсунки.

Таким образом, с использованием анализа размерностей приведена оценка влияния технологических параметров на

размер диаметра капель мазута, образовавшихся после прохождения форсунки. Полученное обобщённое критериальное уравнение адекватно описывает процесс образования капель мазута в форсунках на стендовой установке.

### ВЫВОДЫ

1. Получены гидродинамические зависимости, составленные из чисел гидродинамического подобия, для определения диаметра капель мазута, распыливаемого форсунками.

2. Показано, что в зависимости от технологических режимов происходит изменение диаметра капли мазута.

3. Установлено, что с увеличением скорости распыливающего воздуха диаметр капли мазута снижается, а с увеличением расхода мазута происходит увеличение диаметра капли.

4. Найдено, что с увеличением диаметра отверстия форсунки происходит повышение диаметра капли.

5. Определены оптимальные технологические режимы распыливания мазута форсункой.

6. Удовлетворительная корреляция экспериментальных и расчетных диаметров капли, вычисленных по критериальным зависимостям, подтверждает правильность выведенных математических моделей для расчета диаметра капли мазута.

## ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ КАПЛИ МАЗУТА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПРЕДТОПКЕ

Процесс испарения движущейся капли в цилиндрическом предтопке в значительной степени определяется режимом перемещения единичных капель, из которых состоит факел распыла. При выходе из форсунки капли мазута увлекаются высокоскоростным потоком нагретого распыливающего воздуха. В этом случае по высоте цилиндрического предтопка происходит уменьшение относительной скорости капли мазута, поскольку абсолютная скорость воздуха уменьшается, а движущиеся капли мазута – возрастает, в связи со снижением диаметра его капли (капля испаряется). Результатом данного обстоятельства является изменение режима обтекания капель мазута воздушным потоком от турбулентного, который протекает при  $Re > 500$  до ламинарного  $Re < 0,5$ .

Поставленную задачу решить в общем случае представляется чрезвычайно сложным.

Для облегчения поставленной задачи рассмотрим ее решение отдельно для турбулентного, ламинарного и переходного режимов единичной испаряющейся капли мазута в цилиндрическом предтопке. В целях упрощения представленной задачи допустим следующие упрощения и предположим, что

- капля мазута имеет сферическую форму, при своем движении с потоком воздуха, не происходит деформирования капли, считаем, что поверхность капли мазута в процессе не изменяется, то есть остается постоянной;

- температура поверхности капли устанавливается мгновенно;

- скорость воздуха в омывающем потоке принимаем постоянной;

- температура воздушного потока, омывающего мазутную каплю, постоянна.

- температура воздушного потока, омывающего мазутную каплю, постоянна.

С использованием указанных допущений для решения поставленной задачи можно воспользоваться уравнениями испарения жидкостей и одномерного движения капли с применением теории подобия, как это указано в ранее опубликованных работах [26]. В результате чего получим уравнение следующего вида

С использованием указанных допущений для решения поставленной задачи можно воспользоваться уравнениями испарения жидкостей и одномерного движения капли с применением теории подобия, как это указано в ранее опубликованных работах [26]. В результате чего получим уравнение следующего вида

$$\frac{d(d^2)}{d\tau} = -\sigma \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_{жс}} \cdot D \cdot \Delta C \cdot \left(1 + 0,3 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2}\right) \quad (4.1)$$

$$\frac{dU_K}{d\tau} = \frac{3}{4} \cdot \psi \cdot \frac{\rho_{в}}{\rho_{жс}} \cdot \frac{U^2}{d} \quad (4.2)$$

$\rho_{жс}$ ,  $\rho_{см}$ ,  $\rho_{в}$  - плотности мазута, паровоздушной смеси пограничного слоя капли и окружающего воздуха.

$U = U_{в} - U_K$  - относительная скорость капли.

$\Delta C = C_0 - C_{\infty}$  - градиент концентрации паров.

$C_0$  - концентрация паров мазута.

$C_{\infty}$  - концентрация паров мазута и воздуха.

$D$  - коэффициент диффузии пара мазута в окружающую среду, отнесенной к градиенту концентраций.

$Pr$  - критерий Прандтля.

$Re$  - число Рейнольдса.

$$Re = \frac{U \cdot a}{\nu}$$

$\tau$  - время

$\psi = f(\text{Re})$  - коэффициент лобового сопротивления капли, зависящий от режима ее движения.

При турбулентном движении ( $\text{Re} \geq 500$ )  $\psi = 0,42$

Первым членом уравнения (4.1) из-за его малости можно пренебречь.

$$dU_{\kappa} = -d(U_{\text{г}} - U_{\kappa}) = -dU$$

Учитываем, что

Уравнения (4.1) и (4.2) приводим к виду

$$\frac{dU}{U^2} = 0,29 \cdot \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \frac{1}{d} \cdot d\tau \quad (4.3)$$

$$d(d^2) = -1,9 \cdot \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot D \cdot \Delta C \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \text{Re}^{1/2} \cdot d\tau \quad (4.4)$$

Решим уравнения (4.3) и (4.4)

$$U = \frac{U_0}{\left[ \alpha \cdot \sqrt{U_0} \cdot (\sqrt{d_0} - \sqrt{d}) + 1 \right]^2} \quad (4.5)$$

$$\alpha = \frac{14,6}{79,3} \cdot \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \frac{\sqrt{v}}{D \cdot \Delta C} \cdot \frac{1}{\text{Pr}^{1/9}}$$

$U_0$  и  $d_0$  - значение относительной скорости и диаметра капли в начальный момент движения.

Подставим в (4.3) значение  $U$  из (4.5) разделяя переменные и интегрируя полученные выражения от  $d=d_0$  и от  $\tau=0$  до  $\tau$  получим

$$\tau = \frac{\alpha}{1,89 \cdot \sqrt{U_{\text{г}}}} \cdot \left[ 2,87 \cdot \sqrt{d_0} \cdot U_0 (d^2 - d_0^2) - 3,78 \cdot (\alpha \cdot \sqrt{d_0} \cdot U_0 + 1) \cdot (\sqrt{d} + \sqrt{d_0^3}) \right] \quad (4.6)$$

$$U_{\kappa} = \frac{dx}{d\tau}$$

$$dx = U_x \cdot d\tau = (U_{\text{г}} - U) \cdot d\tau \quad (4.7)$$

Подставим в (4.7) значения  $U$  и  $d\tau$  из уравнения (4.5) и (4.6), разделяя переменные и интегрируя в пределах от  $x=0$  до  $l$  и от  $d=d_0$  до  $d$  в получим

$$\begin{aligned}
 x = & \frac{m \cdot n}{2} \cdot U_0 \cdot (d^2 - d_0^2) - \frac{2}{3} \cdot m \cdot S \cdot U_0 \cdot (\sqrt{d^3} - \sqrt{d_0^3}) + \\
 & + \frac{m \cdot \rho^2}{n^3} \cdot U_0 - \frac{m}{3 \cdot n} \cdot U_0 \cdot (d - d_0) - \frac{2}{3} \cdot \frac{S \cdot m}{n^2} \cdot U_0 \cdot (\sqrt{d} - \sqrt{d_0}) - \frac{m \cdot S^3}{n^3} \cdot U_0 \cdot \ln \frac{S - n \cdot \sqrt{d}}{S - n \cdot \sqrt{d_0}}
 \end{aligned} \quad (4.8)$$

где  $m = \frac{\alpha \cdot \rho_{жс}}{0,29 \cdot \sqrt{U_0} \cdot \rho_0}$  ;

$$n = \alpha \cdot \sqrt{U_0};$$

$$S = \alpha \cdot \sqrt{U_0 \cdot d_0 + 1}$$

Если сейчас проинтегрировать (4.1) с учетом (4.5) и (4.6), то получим

$$\left( \frac{d}{d_0} \right)^2 = \frac{1}{d_0^2} \cdot \left[ \frac{3,89 \cdot (\alpha \cdot \sqrt{U_0 \cdot d_0 + 1})}{\frac{\rho_{жс}}{\rho_{см}} \cdot \frac{1}{D \cdot \Delta C} + 3,89 \cdot \alpha \cdot \sqrt{U_0} - 1,17 \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \sqrt{U_0}} \right]^{3,84}$$

Зададимся рядом значений времени (или по пути) движения капли вычисляем для них  $U$  и  $d$ .

В переходном режиме коэффициент сопротивления  $\psi = \frac{1,76}{\sqrt{\text{Re}}}$ , если  $15 \leq \text{Re} \leq 500$

Подставим  $\psi$  в (4.2) и решая его совместно с (4.1) получаем

$$\left( \frac{U}{U_0} \right)^e = \left( \frac{d}{d_0} \right)^{3,21} \quad \text{и} \quad \text{Re} = \text{Re}_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{1 + \frac{e}{3,21}} \quad (4.10)$$

где  $e = 0,387 \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_0} \cdot \frac{D}{\nu} \cdot \Delta C \cdot \text{Pr}^{1/3}$

Интегрируем вновь (4.2) с учетом (4.10)

$$U = U_0 \cdot \left[ 1 + \frac{9,42}{2} \cdot (1-e) \cdot \frac{\rho_\epsilon}{\rho_{cm}} \cdot \nu \cdot \frac{\sqrt{Rc_0}}{d_0^2} \cdot \tau \right]^{1,9} e^{-1} \quad (4.11)$$

Пройденный путь  $x$  находим, решив дифференциальное уравнение (4.7) с учетом (4.11)

$$x = \frac{2}{9,42} \cdot \frac{\rho_{жс}}{\rho_{cm}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\nu}} \cdot \frac{\sqrt{d_0^3}}{\sqrt{U_0^e}} \cdot \left( \frac{\sqrt{U^{e+1}} - \sqrt{U_0^{e+1}}}{e+1} - U_0 \cdot \frac{\sqrt{U^{e-1}} - \sqrt{U_0^{e-1}}}{e-1} \right) \quad (4.12)$$

Подставив  $Re$  и  $d\tau$  из (4.10) и (4.11) в (4.1), проинтегрируем и получим

$$\left( \frac{d}{d_0} \right)^2 = \left[ 1 + \frac{9,42}{2} \cdot (1-e) \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{cm}} \cdot \nu \cdot \frac{\sqrt{Re_0}}{d_0^2} \cdot \tau \right]^{2,87 \cdot e - 2,87} - 8,23 \cdot \frac{\rho_{cm}}{\rho_{жс}} \cdot \frac{D}{\nu} \cdot \Delta C \cdot \frac{1}{d^2} \cdot \tau \quad (4.13)$$

Если  $0,5 \leq Re \leq 15$ , то  $\psi = 26,75 \cdot Re^{-0,93}$ , то уравнение (4.1) запишется

$$d \left( d_0^2 \right) = -9,97 \cdot \frac{\rho_{cm}}{\rho_{жс}} \cdot D \cdot \Delta C \cdot Re^{0,174} \cdot d\tau \quad (4.14)$$

Подставляя  $\psi = 26,75 \cdot Re^{-0,93}$  в (4.2) и решая его совместно с (4.14) получим

$$\frac{U}{U_0} = \left( \frac{d}{d_0} \right)^k \quad (4.15)$$

$$\text{где } k = \frac{82,3}{21,7} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{сжс}} \cdot \frac{\nu}{D \cdot \Delta C},$$



$$a \quad r = \frac{79}{2} \cdot \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot \nu^{0,795} \cdot \frac{U_0^{1,89}}{d_0^{1,89}}$$

$$U = \left[ U_0 \cdot \frac{1,89 - 0,168 \cdot k}{k} + \left( \frac{(0,168 \cdot k - 1,89) \cdot r}{k} \cdot \tau \right) \right]^{\frac{k}{1,89 - 0,168 \cdot k}} \quad (4.16)$$

$$\text{где } \tau = \frac{80,97}{3,94} \cdot \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{см}}} \cdot \nu^{0,87} \cdot \frac{U_0^{1,89/k}}{d_0^{1,89}}$$

$$x = U_{\text{г}} \cdot \tau + \frac{k \cdot \left[ U_0^{\frac{1,89 - 0,168 \cdot k}{k}} + \frac{r(0,168 \cdot k - 1,89) \cdot \tau}{k} \right]^{\frac{0,87 \cdot k + 1,89}{1,89 - 0,87 \cdot k}}}{r \cdot (1,89 + 0,87 \cdot k)} - \frac{U_0^{\frac{0,87 \cdot k + 1,89}{k}}}{r \cdot (1,89 + 0,87 \cdot k)} \quad (4.17)$$

Уравнения (4.10)-(4.17) позволяют вычислить  $d$ ,  $U$ ,  $\tau$  и  $x$  на участке переходного режима обтекания капли потоком воздуха вплоть до ламинарного режима  $\text{Re} \leq 0,5$

$$\text{Для ламинарного режима} \quad \Psi = \frac{23,87}{\text{Re}}$$

$$dU = -17,85 \cdot \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{см}}} \cdot \nu \cdot \frac{U}{d^2} \cdot d\tau \quad (4.18)$$

$$d(d^2) = -9,84 \cdot \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot D \cdot \Delta C \cdot d\tau \quad (4.19)$$

Интегрируем (4.19)

$$d = \sqrt{d_0^2 - 9,84 \cdot \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_{\text{ж}}} \cdot D \cdot \Delta C \cdot \tau} \quad (4.20)$$

Решаем (4.18) и (4.19)

$$U = U_0 \left( \frac{d}{d_0} \right)^{2 \cdot t} \quad (4.21)$$

где  $t = 1,783 \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_{жс}} \cdot \frac{v}{D \cdot \Delta C}$

Интегрируя (4.17) с учетом (4.19) и (4.21)

$$x = U_0 \cdot \tau + \frac{U_0 \left[ \left( d_0^2 + 9,84 \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_{жс}} \cdot D \cdot \Delta C \cdot \tau \right)^{t+1} - \left( d_0^2 \right)^{t+1} \right]}{9,84 \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_{жс}} \cdot (t+1) \cdot D \cdot \Delta C \cdot d_0^{2 \cdot t}} \quad (4.22)$$

Произведем расчет при диаметре капли  $d=2358 \cdot 10^{-6}$  м, расходе мазута  $Q_{маз}=0,8$  см<sup>3</sup>/с и  $Q_{возд}=0,9$  см<sup>3</sup>/с для турбулентного, двух переходных и ламинарного режима.

Время испарения капли мазута

$$\tau = \frac{d^2}{k_{исп}} \quad (4.23)$$

где  $k_{исп}$  - коэффициент испарения капли мазута,  $k_{исп}=0,0215 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с

$$\tau = \frac{(2358 \cdot 10^{-6})^2}{0,0215 \cdot 10^{-4}} = 2,5861 \text{ с,}$$

Площадь сечения отверстия

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4},$$

где D-диаметр отверстия, D=0,006 м

$$F = \frac{3,14159 \cdot 0,006^2}{4} = 0,00002827 \text{ м}^2$$

Скорости мазута и воздуха

$$U_M = \frac{Q_M}{F}, \quad U_a = \frac{Q_a}{F},$$

$$U_M = \frac{8 \cdot 10^{-7}}{2,8274 \cdot 10^{-5}} = 0,02829 \quad \text{м/с}, \quad U_a = \frac{9 \cdot 10^{-7}}{2,8274 \cdot 10^{-5}} = 0,03183 \quad \text{м/с}$$

### Турбулентный режим движения

$$\alpha = \frac{14,6}{79,3} \cdot \frac{1,122}{50,2} \cdot \frac{\sqrt{1,56 \cdot 10^{-5}}}{1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95} \cdot \frac{1}{27^{1/9}} = 0,6664$$

$$m = \frac{0,6664 \cdot 50,2}{0,29 \cdot \sqrt{0,02829} \cdot 1,122} = 611,239;$$

$$n = 0,6664 \cdot \sqrt{0,02829} = 0,1121;$$

$$S = 0,6664 \cdot \sqrt{0,02829 \cdot 2,358 \cdot 10^{-3} + 1} = 0,66644;$$

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^2 = \frac{1}{(2,358 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \left[ \frac{3,89 \cdot (0,6664 \cdot \sqrt{0,02829 \cdot 2,358 \cdot 10^{-3} + 1})}{\frac{50,2}{3,576} \cdot \frac{1}{1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95} + 3,89 \cdot 0,6664 \cdot \sqrt{0,02829} - 1,17 \cdot 27^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{0,02829}} \right]^{3,84} =$$

$$= 8,644 \cdot 10^{-16}$$

$$d = 2,358 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{8,644 \cdot 10^{-16}} = 6,93 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

Тогда

$$x = \frac{611,239 \cdot 0,1121}{2} \cdot 0,03183 \cdot \left( (6,93 \cdot 10^{-3})^2 \right) - \frac{2}{3} \cdot 611,239 \cdot 0,6664 \cdot 0,03183 \cdot$$

$$\cdot \left( \sqrt{(6,93 \cdot 10^{-11})^3} - \sqrt{(2,358 \cdot 10^{-3})^3} \right) + \frac{611,239 \cdot (2,358 \cdot 10^{-3})^2}{0,1121^3} \cdot 0,02829 - \frac{611,239}{3 \cdot 0,1121} \cdot$$

$$\cdot (6,93 \cdot 10^{-11} - 2,358 \cdot 10^{-3}) - \frac{2}{3} \cdot \frac{0,6664 \cdot 611,239}{0,1121^2} \cdot 0,02829 \cdot \left( \sqrt{6,93 \cdot 10^{-11}} - \sqrt{2,358 \cdot 10^{-3}} \right) -$$

$$- \frac{0,6664^3}{0,1121^3} \cdot 611,239 \cdot 0,02829 \cdot \ln \frac{0,6664 - 0,1121 \cdot \sqrt{6,93 \cdot 10^{-11}}}{0,6664 - 0,1121 \cdot \sqrt{2,358 \cdot 10^{-3}}} = 0,0787 \text{ м}$$

**Переходный режим 1 ( $15 \leq Re \leq 500$ )**

$$e = 0,387 \cdot \frac{3,5759}{1,122} \cdot \frac{1,78 \cdot 10^{-5}}{1,56 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,95 \cdot 27^{1/3} = 0,0897$$

$$U = 0,02829 \cdot \left[ 1 + \frac{9,42}{2} \cdot (1 - 0,0897) \cdot \frac{1,122}{3,5759} \cdot 1,56 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\sqrt{25}}{(2,358 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 2,5861 \right]^{\frac{1,0}{0,0897-1}} =$$

$$= 0,00124 \text{ м/с}$$

$$x = \frac{2}{9,42} \cdot \frac{50,2}{1,122} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,56 \cdot 10^{-5}}} \cdot \frac{\sqrt{(2,358 \cdot 10^{-3})^3}}{\sqrt{0,02829^{0,0897}}}$$

$$\cdot \left( \frac{\sqrt{(1,24 \cdot 10^{-3})^{0,0897+1}} - \sqrt{0,02829^{0,0897+1}}}{0,0897+1} \right) -$$

$$\left( 0,03183 \cdot \frac{\sqrt{(1,24 \cdot 10^{-3})^{0,0897-1}} - \sqrt{0,02829^{0,0897-1}}}{0,0897-1} \right) = 0,01457 \text{ м}$$

**Переходный режим 2 ( $0,5 \leq Re \leq 15$ )**

$$k = \frac{80,76}{19,93} \cdot \frac{1,122}{50,2} \cdot \frac{1,56 \cdot 10^{-5}}{1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95} = 0,0782$$

$$r = \frac{79}{2} \cdot \frac{1,122}{50,2} \cdot (1,56 \cdot 10^{-5})^{0,795} \cdot \frac{0,02829^{\frac{1,89}{0,0782}}}{(2,358 \cdot 10^{-3})^{1,89}} = 4,68 \cdot 10^{-37}$$

$$x = \frac{0,0782 \cdot \left[ 0,02829 \cdot \frac{1,89-0,168 \cdot 0,0782}{0,0782} + \frac{4,68 \cdot 10^{-37} \cdot (0,168 \cdot 0,0782 - 1,89)}{0,0782} \cdot 2,5861 \right]^{\frac{0,87-0,0782+1,89}{1,89-0,87-0,0782}}}{4,68 \cdot 10^{-37} \cdot (1,89 - 0,87 \cdot 0,0782)} +$$

$$+ 0,03183 \cdot 2,5861 - \frac{0,02829}{4,68 \cdot 10^{-37} \cdot (1,89 + 0,87 \cdot 0,0782)} = 0,1602 \text{ м}$$

### Ламинарный режим $Re \leq 0,5$

$$t = 1,783 \cdot \frac{1,122}{3,5759} \cdot \frac{1,56 \cdot 10^{-5}}{1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95} = 0,5161$$

$$x = \frac{0,0289 \left[ (2358 \cdot 10^{-6})^2 + 9,84 \cdot \frac{3,5759}{50,2} \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot 2,5861 \right]^{0,5161+1} - (2,358 \cdot 10^{-3})^{2(0,3+0)}}{9,84 \cdot \frac{3,5759}{50,2} \cdot (0,5161+1) \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot (2,358 \cdot 10^{-3})^{2 \cdot 0,5161}} +$$

$$+ 0,03183 \cdot 2,5861 = 0,2235 м$$

### ВЫВОДЫ

1. Произведен расчет движения испаряющейся капли мазута.

2. Методом анализа размерностей получены критериальные уравнения из чисел гидродинамического подобия удовлетворительно описывающие движение испаряющейся капли мазута в цилиндрическом предтопке.

3. Показано, что в зависимости от режима обтекания капли мазута воздушным потоком процесс может протекать в ламинарном, переходном или турбулентном режимах.

4. Установлено, что минимальный путь в цилиндрическом предтопке проходит испаряющаяся капля мазута при турбулентном режиме ( $Re > 500$ ).

5. Найдены совершенные гидродинамические режимы, обеспечивающие быстрое испарение капли мазута.

6. С использованием теории подобия разработаны модели, позволяющие определить продолжительность существования капли распыливаемого форсункой мазута.

7. Установлено, что с увеличением турбулизации потока происходит повышение скорости испарения капли мазута в цилиндрическом предтопке.

8. Впервые с использованием метода анализа размерностей получена математическая модель испарения движущейся капли мазута в зависимости от гидродинамических режимов.

9. Полученные данные позволяют расчетным путем определить размеры предтопка, предназначенного для газификации мазута с целью его обессеривания и получения горючего газа с высокой теплотой сгорания.

## ГЛАВА 5. КИНЕТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ МАЗУТА

Мазут является одним из основных видов энергетического топлива, служащего для получения тепловой и электрической энергии. Учитывая, что мазут имеет высокую вязкую конституцию, которая затрудняет распыливание этого топлива форсунок, а испарение мазута происходит быстрее, чем его воспламенение, то представляет значительный интерес исследовать влияние температуры на скорость испарения распыливаемого мазута.

В качестве основного метода подготовки жидкого топлива (мазута) на тепловых электростанциях может быть использована термическая технология при комплексной энерготехнологической его переработке.

Процесс термической подготовки топлива протекает при высоких температурах 400-1800 °С [27, 28].

Процесс термической подготовки органического топлива состоит из трёх стадий:

- физического процесса прогрева распылённого жидкого топлива;
- химического процесса разложения жидкого топлива;
- вторичных процессов изменения газообразных продуктов разложения мазута в зоне высоких температур.

Одним из важнейших условий описания любого термического процесса является точное установление схем превращения топлива и детального анализа кинетики реакции. На основе анализа механизма и кинетики реакции испарения капли мазута можно установить продолжительность испарения капли и длину пути движения капли. На основании кинетических закономерностей процесса решаются задачи проектирования реакционной аппаратуры.

Такой аналитический подход впервые применен нами к исследованию и разработке процесса испарения капли мазута.

Обобщённое кинетическое уравнение изотермической реакции имеет вид:

$$-\frac{dC}{d\tau} = k \cdot C^n \quad (5.1)$$

где

$k$  – константа скорости процесса разложения мазута,  
 $\text{г}/(\text{г} \cdot \text{с})$ ;

$\tau$  – продолжительность контакта, с;

$n$  – порядок реакции;

$C$  – количество неразложившегося органического топлива, равное разности между максимальным и действительным выходом продуктов разложения топлива.

В неизотермических условиях [29, 30] испарения мазута происходит повышение температуры, поэтому уравнение (5.1) примет вид:

$$-\frac{dC}{d\tau} = k_0 \cdot e^{-E/R \cdot T} \cdot C^n \quad (5.2)$$

При условии равномерного обогрева скорость нагрева  $q = dT / d\tau$  является постоянной величиной. В этом случае уравнение (5.2) можно представить следующим образом:

$$-\frac{dC}{d\tau} = \frac{k_0}{q} \cdot e^{-E/R \cdot T} \cdot C^n \quad (5.3)$$

где

$R$  – газовая постоянная;

$E$  – энергия активации;

$k_0$  – предэкспоненциальная модель.

С этой целью было изучено влияние температуры на скорость испарения мазута марки М100. Исследование проводили в температурном диапазоне 400-1600 °С. Полученные результаты константы испарения приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 Константы испарения мазута М100

Температура, °С	Экспериментальные данные коэффициента испарения мазута М100 ( $k_{исп} \cdot 10^4, \text{ м}^2/\text{с}$ )			
	К1	К2	К3	Кср
1600	1,01	0,998	1,005	1,004
1400	0,8	0,84	0,78	0,807
1200	0,56	0,54	0,55	0,55
1000	0,37	0,32	0,33	0,34
800	0,21	0,18	0,19	0,193
600	0,075	0,096	0,077	0,083
400	0,0187	0,0202	0,0196	0,0195

В результате анализа данных приведённых в табл.5.1 установлено, что с увеличением температуры от 400 °С до 1600 °С происходит повышение скорости испарения мазута от  $0,0195 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $1,004 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ . Повышение температуры в 4 раза способствует увеличению скорости испарения капли в 51,5 раза. Для получения надёжных экспериментальных данных проводилось три параллельных опыта при одной и той же температуре.

Зависимость константы скорости испарения мазута от обратной температуры приведена на рис. 5.1.

Из рис. 5.1 следует, что логарифмы константы скорости испарения прямо пропорционален обратной температуре. В соответствии с экспериментальными данными полученная зависимость может быть описана уравнением:

$$k_p = A \cdot e^{-E/R \cdot T} \quad (5.4)$$

Из рис. 5.1 определим значение предэкспоненциального множителя  $A=91,74 \cdot 10^{-5}$  и энергии активации испарения мазута  $E=34769,6 \text{ Дж/моль}$ .

В таблице 5.2 приведены данные по испарению капли мазута диаметром  $2358 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  при различных температурах.



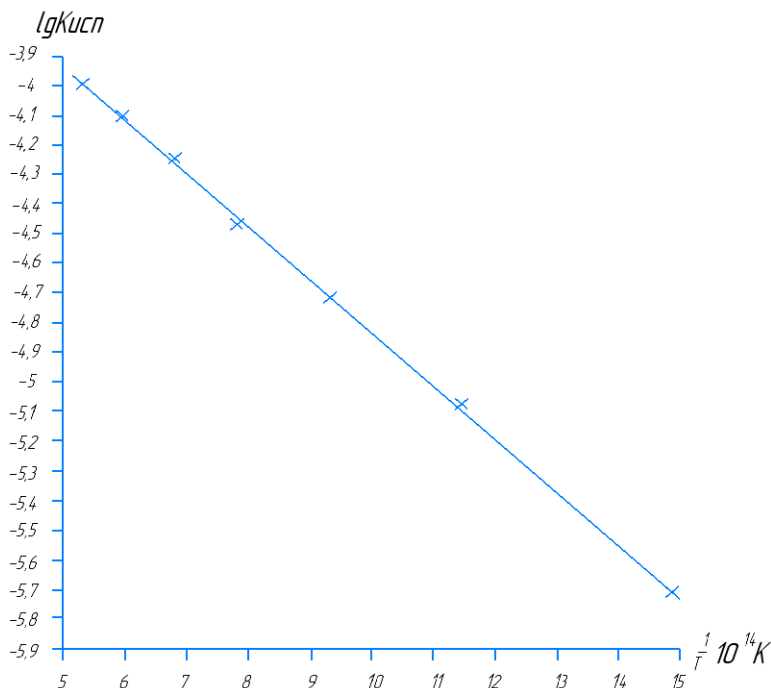


Рис. 5.1 Зависимость логарифма константы скорости испарения мазута от обратной температуры

Время испарения капли мазута рассчитано по уравнению:

$$\tau = \frac{d^2}{k_{исп}} \quad (5.5)$$

Анализ экспериментальных данных полученных нами показывает, что процесс испарения капли мазута М100 протекает в кинетической области, поскольку повышение температуры на 10°C приводит к увеличению скорости испарения в 2 раза.

Зависимость времени испарения от температуры приведена в виде графической зависимости показана на рис. 5.2.

Таблица 5.2 Время испарения капли мазута марки М100

Температура, °С	Время испарения, с
1600	0,0554
1400	0,0689
1200	0,1011
1000	0,1635
800	0,2881
600	0,6699
400	2,8514

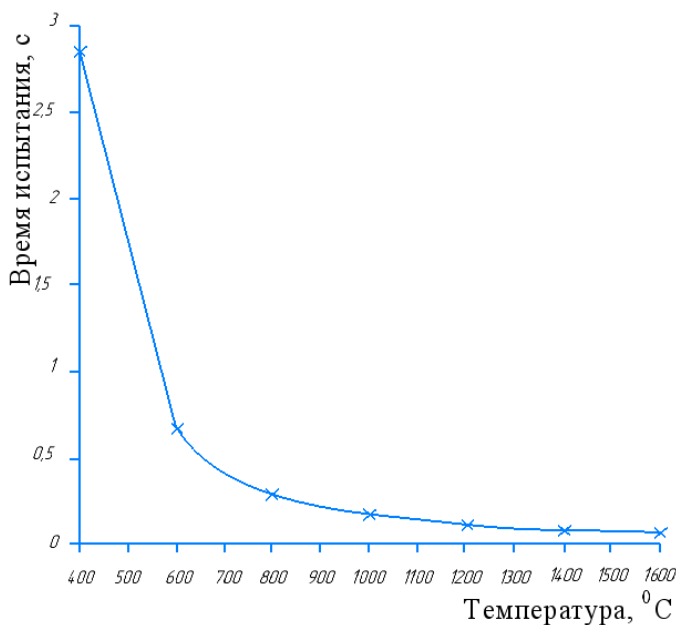


Рис. 5.2 Графическая зависимость времени испарения мазута марки М100 от его температуры

Из рис. 5.2 следует, что с повышением температуры от 400°С до 1600°С время испарения капли мазута диаметром  $2358 \cdot 10^{-6}$  м снижается от 2,8514 с до 0,0554 с, то есть в 51,5 раз.

Таким образом, испарение капли мазута при высоких температурах 1000-1600°С протекает практически мгновенно.

При этих условиях, в течение 0,16-0,055 с мазут превращается в парообразное состояние. Следовательно, для увеличения скорости испарения мазута следует повышать температуру. Полученные экспериментальные данные указывают, что реакция испарения мазута подчиняется кинетическим закономерностям процесса.

### ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние температуры на скорость испарения капли мазута в температурном интервале 400-1600 °С и показано, что испарение при таких температурах происходит практически мгновенно.

2. Установлено, что с увеличением температуры в 4 раза скорость испарения мазута возрастает в 1,25 раза.

3. Определены численные значения константы испарения и энергии активации, получены кинетические уравнения процесса испарения мазута.

4. Найдена зависимость времени испарения мазута от температуры.

5. Показано, что с увеличением температуры в четыре раза время испарения снижается в 5,2 раза.

6. В результате анализа кинетических данных испарения капли мазута можно решать задачи, связанные с проектированием предтопок и топочных камер.

7. Установлено, что в широком диапазоне технологических параметров испарения капли мазута подчиняется одним и тем же кинетическим закономерностям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана новая технологическая схема термической подготовки органического топлива к сжиганию в топках энергетических котлов.

Комплексные энерготехнологические процессы использования мазута позволяют максимально снизить удельный расход топлива, повысить эффективность использования тепловой энергии и коэффициент полезного действия котельного агрегата до 90-92%. Кроме того, высокотемпературная термическая топливоподготовка на тепловых электрических станциях позволяет значительно снизить токсичные выбросы оксидов и диоксидов серы в атмосферу.

Так как в процессе газификации мазута газообразные сернистые соединения легко поглощаются молекулярными ситами. Степень поглощения сернистых соединений молекулярными ситами составляет 99 %. Внедрение предложенного нами энерготехнологического процесса с одновременным обессериванием представляет значительный интерес для энергетики, поскольку в настоящее время во всём мире наметилась добыча и переработка сернистых нефтей содержанием серы свыше 5 %. Мазуты, полученные из таких нефтей, содержат серы свыше 3% и требуют очистки от сернистых соединений.

Высокотемпературная физико-химическая подготовка топлива происходит в результате деструкции органических и сернистых соединений топлива с образованием газообразных, жидких и твёрдых продуктов. С целью осуществления данного энерготехнологического процесса необходимо произвести распыливание мазута на мелкие капли. Для этого с использованием метода анализа размерностей исследованы гидродинамические закономерности дробления мазута на мелкие капли. Установлено влияние технологических факторов на размер капель мазута. Получены гидродинамические модели, составленные из чисел гидродинамического подобия для

расчёта диаметра капель мазута, удовлетворительная корреляция которых (относительная ошибка не более 10 %) с экспериментальными данными подтверждает правильность выведенных критериальных уравнений.

Получена гидродинамическая модель, позволяющая рассчитать время испарения капли мазута при ламинарном, переходном и турбулентном обтекании капли воздушным потоком, а также минимальный отрезок пути движения капли, что позволяет определить размеры предтопка.

Изучены кинетические закономерности испарения капли мазута. Определены скорости испарения в зависимости от температуры и энергии активации испарения капли жидкого топлива. Получено кинетическое уравнение процесса испарения мазута.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Геплер З. Н. Высоковязкие мазуты как котельное и печное топливо. М.: Гостопиздат. 1959. с. 327.
2. Белосельский Б. С. Топочные мазуты. М.: Энергия. 1978. с. 276.
3. Поконова Ю. В., Гайле А. А., Спиркин В.Г. Химия нефти Л.: Химия. 1987. с. 314.
4. Negazi A. H., El-Gayar M. Sh. Неуглеводородные компоненты сырой нефти и их роль в процессах переработки тяжелых фракций // Нефтехимия 2017, том 57, №5, с. 515-519.
5. Головкин А. К., Горбунова Л. В., Камьянов В. Ф. Закономерности в структурно-групповом составе высокомолекулярных гетероатомных компонентов нефтей // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 3, с. 364-374.
6. Галиев Л. Г. Сернистые соединения мазутных фракций нефти. Материалы докладов Международного конгресса. Казань: КФ МЭИ. 1995. с. 4-5.
7. Халикова Д. А., Петров С. М., Башкирцева Н. Ю. Обзор перспективных технологий переработки тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 3. С. 217-221.
8. Moghadam S., Nobakht M., Yongan G. Journal of Petroleum Science and Engineering. №2. 2009. 93-104
9. Харлампида Х. Э. Сероорганические соединения нефти, методы очистки и модификации // Соровский образовательный журнал. 2000. Т.6 №7. с. 42-46.
10. Маркин А. Н., Низамов Р. Э., Суховерхов С. В. Нефтепромысловая химия: практическое руководство. Владивосток: Дальнаука, 2011. - 288 с.
11. Броун А. С., Сиверцев А. П. Химия сернистых соединений жидкого топлива. Л.: ОНТИ. 1987. с. 278.
12. Зайнуллин З. Н., Галиев И. Г. Сжигание высокосернистых мазутов на тепловых электрических станциях. Казань: КГТУ. 1995. с. 71.

13. Липантьев Р. Е., Тутубалина В. П. Исследование работы электрических станций на сернистых и малосернистых мазутах/ Проблемы энергетики №7-8 2010 с. 144-147.
14. Глухов Б. Ф., Белосельский В. С. Некоторые особенности распыливания высокоподогретого мазута. Теплоэнергетика. 1986. №9. с. 36-39.
15. Таймаров М. А., Симаков А. В., Егоров В. А. Расчет длины факела и интенсивности выгорания капель при сжигании мазута // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 20. С. 146-149.
16. Липантьев Р. Е., Тутубалина В. П. Влияние сернистых соединений на эксплуатационные характеристики мазута М100 // Проблемы энергетики. - 2012. - №1-2. - С. 172-175
17. Доброходов В. И., Ольховский Г. Г. Некоторые проблемы научно-технического прогресса на тепловых электростанциях. Теплоэнергетика. 1994. №9 с. 2-7.
18. Резников М. И., Липов Ю. М. Паровые котлы тепловых электростанций. М.: Энергоиздат. 1989. с. 240.
19. Соколов Б. А. Устройство и эксплуатация паровых и водогрейных котлов малой и средней мощности. М.: Академия. 2008. - 64 с.
20. Резников М. И. Парогенераторные установки электростанций. М.: Энергия. 1974. с. 360.
21. Роддатис К. Ф. Котельные установки. М.: Энергия. 1977. с. 414.
22. Ионкин И. Л., Супранов В. М., Егорова Л. Е., Плешанов К. А. Паровые котлы: основы поверочного расчета: Учебно-методическое пособие по курсу «Котельные установки» - М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. – 68 с.
23. Адлер Ю. П., Марков Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.-Л.: Наука. 1976 с. 283.
24. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.-Л.: Наука. 1965. с. 212.
25. Слинко М. Г. Химические процессы и реакторы. ЖВХО им. Д. И. Менделеева. Т.25. 1980 №5 с. 531-536.

26. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств Учебное пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1991. - 400 с.
27. Панов В. И. Повышение эффективности электроэнергии за счет энерготехнологических схем топливоиспользования. Обзор. М.: Информэнерго. 1975. с. 61.
28. Андриющенко А. И., Попов А. И. Основы проектирования энерготехнологических установок электростанций. М.: Высшая школа. 1980. с. 240.
29. Бенсон С. Основы химической кинетики. М.: Мир. 1964. с. 500.
30. Кнорре Д. Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа. 1979. с. 40.



**ПРИЛОЖЕНИЕ 1.**

*Таблица 1. Расчетные и экспериментальные данные по истечению мазута из форсунки при диаметре отверстий  $D=0,002$  м*

Диаметр капли d $10^{-6}$ м		Расход мазута $Q_{\text{маз}}$ , $\text{см}^3/\text{с}$									
		0,8	2,0	3,2	4,4	5,6	6,8	8,0	9,2	10,4	11,6
Ввод 0,9 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	896,9	1001	1059	1101	1133	1160	1182	1202	1220	1236
	Эксп.	945	1016	1021	1060	1093	1138	1163	1193	1207	1253
	%	5,1	8,5	3,4	3,7	3,1	1,9	6,8	0,8	9,2	1,3
Ввод 2,1 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	810,2	904,3	956,8	994,1	1023	1047	1068	1086	1102	1117
	Эксп.	851,2	845,5	1052	918,5	1084	1132	965,5	1034	1026	1013
	%	5,1	6,5	9,9	7,6	5,9	8,1	9,6	4,8	6,9	9,3
Ввод 3,3 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	767,4	856,6	906,3	941,6	969,2	992,1	1012	1029	1044	1058
	Эксп.	844	784,6	817,5	1036	1056	924,6	958	949,5	1130	1126
	%	10	8,4	9,8	10	9,5	6,8	5,3	7,7	8,2	6,4
Ввод 4,5 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	739,4	825,3	873,2	907,2	933,8	955,9	974,7	991,2	1006	1019
	Эксп.	761,3	881,4	786	823	986	909	1068	1035	946	1058
	%	3,0	6,8	10	9,3	5,6	4,9	9,6	4,4	6,0	3,8
Ввод 5,7 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	718,7	802,2	848,8	881,8	907,7	929,1	947,4	963,4	977,7	990,6
	Эксп.	759	834,3	762	944	997	1008	884	1050	923	1086
	%	5,6	4,0	10	7,1	9,8	8,5	6,7	9,0	5,6	9,6
Ввод 6,9 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	702,4	784	829,5	861,8	887,1	908,1	925,9	941,6	955,6	968,2
	Эксп.	768	861	783	811	953	968	1005	850,3	867	1015
	%	9,3	9,8	5,6	5,9	7,4	6,6	8,5	9,7	9,3	4,8
Ввод 8,1 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	689	769,1	813,7	845,4	870,2	890,8	908,3	923,7	937,3	949,7
	Эксп.	727,5	807	865	761	823	793	979	888	1008	890
	%	5,6	4,9	6,3	10	5,4	9,9	7,8	3,9	7,5	6,3
Ввод 9,3 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	677,7	756,5	800,3	831,5	855,9	876,1	893,1	908,5	921,9	934,1
	Эксп.	704	829	859	785,8	781,5	795,5	977,5	970,3	834	857
	%	3,9	9,6	7,3	5,5	8,7	9,2	9,4	6,8	9,5	7,1
Ввод 10,5 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	667,9	745,5	788,8	819,5	843,6	863,4	880,4	895,3	908,6	920,6
	Эксп.	730,7	788	721	756,5	790	900,5	819	925	828	968,5
	%	9,4	5,7	8,6	7,7	6,4	4,3	7,0	3,3	8,9	5,2
Ввод 11,7 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	659,3	735,9	778,6	808,9	832,7	852,3	869,1	883,8	896,9	908,7
	Эксп.	961	680	820	892	908	779	940,5	964	839,5	831,5
	%	4,8	7,6	5,3	9,4	9,0	8,6	8,2	9,1	6,4	8,5

Примечание: в качестве экспериментальных данных взято среднearифметическое значение трех опытов.

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СЕРНИСТЫХ  
МАЗУТОВ К СЖИГАНИЮ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ**

*Таблица 2. Расчетные и экспериментальные данные по истечению мазута из форсунки при диаметре отверстий  $D=0,003$  м*

Диаметр капли $d \cdot 10^6$ м		Расход мазута $Q_{\text{шт.}}, \text{см}^3/\text{с}$									
		0,8	2,0	3,2	4,4	5,6	6,8	8,0	9,2	10,4	11,6
Ввозд 0,9 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1281	1430	1513	1572	1619	1657	1689	1718	1743	1766
	Эксп.	1369	1559	1438	1692	1565	1577	1581	1574	1914	1885
	%	6,8	9,0	5,0	7,6	3,3	4,8	5,9	8,4	9,8	6,7
Ввозд 2,1 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1158	1292	1367	1420	1462	1497	1526	1552	1575	1596
	Эксп.	1052	1166	1240	1547	1354	1571	1431	1608	1482	1478
	%	9,1	9,8	9,3	8,9	7,4	5,0	6,2	3,6	5,9	7,4
Ввозд 3,3 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1096	1224	1295	1345	1385	1418	1445	1470	1492	1511
	Эксп.	1175	1289	1212	1254	1140	1478	1555	1374	1378	1656
	%	7,2	5,3	6,4	6,8	9,1	4,3	7,6	6,5	7,6	9,6
Ввозд 4,5 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1056	1179	1248	1296	1334	1366	1393	1416	1437	1456
	Эксп.	1145	1074	1152	1417	1412	1498	1269	1348	1315	1536
	%	8,4	8,9	7,7	9,3	5,8	9,7	8,9	4,8	8,5	5,5
Ввозд 5,7 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1026	1146	1213	1260	1297	1327	1354	1377	1397	1415
	Эксп.	924,1	1261	1106	1191	1237	1328	1489	1319	1278	1302
	%	10	10	8,8	5,5	4,6	6,4	10	4,2	6,3	8,0
Ввозд 6,9 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1004	1120	1185	1231	1268	1297	1323	1345	1365	1383
	Эксп.	950	1035	1295	1126	1361	1347	1384	1224	1468	1253
	%	5,3	7,6	9,3	8,6	7,4	3,8	4,6	9,0	7,5	9,4
Ввозд 8,1 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	984,4	1099	1163	1208	1243	1273	1298	1320	1339	1357
	Эксп.	1059	1062	1108	1149	1324	1149	1405	1245	1219	1460
	%	7,6	3,4	4,7	4,9	6,5	9,7	8,3	5,7	9,0	7,6
Ввозд 9,3 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	968,3	1081	1144	1188	1223	1252	1276	1298	1317	1335
	Эксп.	922	1153	1099	1150	1294	1310	1202	1176	1197	1413
	%	4,8	6,7	3,9	3,2	5,8	4,6	5,8	9,4	9,1	5,9
Ввозд 10,5 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	954,3	1065	1127	1171	1275	1234	1258	1279	1298	1315
	Эксп.	1019	1123	1259	1269	1390	1134	1382	1404	1411	1260
	%	6,8	5,4	9,0	8,4	7,3	8,1	9,6	9,8	8,7	4,2
Ввозд 11,7 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	941,9	1051	1112	1156	1190	1218	1242	1263	1281	1298
	Эксп.	1030	961	1014	1266	1138	1290	1346	1350	1207	1176
	%	9,3	8,6	8,9	9,5	4,3	5,9	8,4	6,9	5,8	9,0

Примечание: в качестве экспериментальных данных взято среднеарифметическое значение трех опытов.

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СЕРНИСТЫХ  
МАЗУТОВ К СЖИГАНИЮ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ**

*Таблица 3. Расчетные и экспериментальные данные по истечению мазута из форсунки при диаметре отверстий  $D=0,004$  м*

Диаметр капли d $10^{-6}$ м		Расход мазута $Q_{\text{м.з.}}$ , см <sup>3</sup> /с									
		0,8	2,0	3,2	4,4	5,6	6,8	8,0	9,2	10,4	11,6
Ввод 0,9 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1651	1843	1949	2025	2085	2134	2176	2213	2246	2275
	Эксп.	1520	1949	1781	1742	2179	1991	2259	2421	2136	2357
	%	7,9	5,8	8,2	9,6	4,5	6,7	3,8	9,4	4,9	3,6
Ввод 2,1 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1491	1664	1761	1830	1883	1928	1966	1999	2028	2055
	Эксп.	1583	1822	1636	1667	1763	1754	1797	2097	1951	2162
	%	6,2	9,5	7,1	8,9	6,4	9,0	8,6	4,9	3,8	5,2
Ввод 3,3 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1412	1577	1668	1733	1784	1826	1862	1893	1921	1947
	Эксп.	1295	1460	1523	1892	1889	1961	2009	1774	1775	2104
	%	8,3	7,4	8,7	9,2	5,9	7,4	7,9	6,3	7,6	8,1
Ввод 4,5 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1361	1519	1607	1670	1719	1759	1794	1824	1851	1876
	Эксп.	1283	1444	1708	1768	1557	1583	1399	1656	1957	1994
	%	5,7	4,9	6,3	5,9	9,4	10	8,8	9,2	5,7	6,3
Ввод 5,7 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1323	1476	1562	1623	1671	1710	1744	1773	1799	1823
	Эксп.	1203	1333	1703	1743	1610	1628	1651	1672	1965	1967
	%	9,5	9,7	9,0	7,4	3,6	4,8	5,3	5,7	9,2	7,9
Ввод 6,9 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1293	1443	1527	1586	1633	1671	1704	1733	1759	1782
	Эксп.	1388	1346	1469	1587	1757	1766	1590	1587	1644	1867
	%	7,4	8,3	3,8	4,1	7,6	5,7	6,7	8,4	6,5	4,8
Ввод 8,1 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1268	1415	1498	1556	1602	1639	1672	1700	1725	1748
	Эксп.	1186	1335	1391	1464	1453	1480	1754	1790	1787	1842
	%	6,5	5,7	7,1	5,9	9,3	9,7	4,9	5,3	3,6	5,4
Ввод 9,3 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1247	1392	1473	1530	1575	1612	1644	1672	1697	1719
	Эксп.	1352	1264	1326	1674	1434	1501	1764	1749	1839	1621
	%	8,4	9,2	10	9,4	8,8	6,9	7,3	4,6	8,4	5,7
Ввод 10,5 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1229	1372	1452	1508	1553	1589	1620	1648	1672	1694
	Эксп.	1157	1312	1363	1387	1657	1681	1468	1501	1766	1809
	%	5,9	4,4	6,1	7,9	6,7	58	9,4	8,9	5,6	6,8
Ввод 11,7 см <sup>3</sup> /с	Расч.	1223	1354	1433	1489	1532	1569	1599	1627	1651	1672
	Эксп.	1336	1236	1298	1365	1647	1642	1689	1570	1492	1791
	%	9,2	8,7	9,4	8,3	7,5	4,7	5,6	3,5	9,6	7,1

Примечание: в качестве экспериментальных данных взято среднearифметическое значение трех опытов.

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СЕРНИСТЫХ  
МАЗУТОВ К СЖИГАНИЮ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ**

*Таблица 4. Расчетные и экспериментальные данные по истечению мазута из форсунки при диаметре отверстий  $D=0,006$  м*

Диаметр капли d $10^{-6}$ м		Расход мазута $Q_{\text{млт}}$ , $\text{см}^3/\text{с}$									
		0,8	2,0	3,2	4,4	5,6	6,8	8,0	9,2	10,4	11,6
Ввод 0,9 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	2358	2632	2785	2894	2979	3099	3109	3162	3208	3251
	Эксп.	2174	2461	2950	2625	2728	3238	2944	3038	2965	3514
	%	7,8	6,5	5,9	9,3	8,4	4,5	5,3	3,9	7,6	8,1
Ввод 2,1 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	2130	2378	2516	2614	2691	2754	2808	2856	2898	2936
	Эксп.	2211	2513	2400	2449	2545	3005	3028	3090	2774	3098
	%	3,8	5,7	4,6	6,3	5,4	9,1	7,8	8,2	4,3	5,4
Ввод 3,3 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	2018	2252	2383	2476	2549	2609	2660	2705	2745	2781
	Эксп.	1883	2464	2581	2665	2314	2778	2764	2448	2929	2523
	%	6,7	9,4	8,3	7,6	9,2	6,5	3,9	9,5	6,7	9,3
Ввод 4,5 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1944	2170	2296	2386	2456	2513	2563	2606	2645	2680
	Эксп.	2059	2350	2142	2195	2242	2697	2737	2773	2862	2468
	%	5,9	8,3	6,7	8,0	8,7	7,3	6,8	6,4	8,2	7,9
Ввод 5,7 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1890	2109	2232	2319	2387	2443	2491	2533	2571	2605
	Эксп.	1714	1950	2038	2469	2551	2680	2289	2771	2720	2769
	%	9,3	7,6	8,7	6,5	6,9	9,7	8,1	9,4	5,8	6,3
Ввод 6,9 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1847	2062	2181	2266	2333	2388	2345	2476	2513	2546
	Эксп.	1928	1981	2297	2110	2158	2593	2320	2667	2276	2291
	%	4,4	3,9	5,3	6,9	7,5	8,6	4,7	7,8	9,4	10
Ввод 8,1 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1818	2022	2140	2223	2288	2342	2388	2429	2465	2497
	Эксп.	1658	2160	1981	2096	2398	2127	2198	2600	2666	2657
	%	8,5	6,8	7,4	5,8	4,8	9,2	7,7	6,9	8,3	6,4
Ввод 9,3 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1782	1989	2105	2186	2251	2304	2349	2389	2424	2456
	Эксп.	1730	1796	1974	2390	2442	2534	2211	2298	2036	2532
	%	2,9	9,7	6,2	9,3	8,5	10	5,9	3,8	9,4	3,9
Ввод 10,5 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1756	1960	2074	2155	2218	2270	2315	2354	2389	2421
	Эксп.	1888	2054	2252	2054	2056	2468	2528	2583	2188	2283
	%	7,5	4,8	8,6	4,7	7,3	6,9	9,2	9,7	8,4	5,7
Ввод 11,7 $\text{см}^3/\text{с}$	Расч.	1734	1935	2047	2127	2190	2241	2285	2324	2358	2389
	Эксп.	1716	2107	1861	1970	2041	2351	2441	2154	2453	2208
	%	10	8,9	9,1	7,4	6,8	4,9	6,8	7,3	3,9	7,6

Примечание: в качестве экспериментальных данных взято среднearифметическое значение трех опытов.

**МОНОГРАФИЯ**

ЛИПАНТЬЕВ Р. Е.  
ТУТУБАЛИНА В. П.

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ  
ПОДГОТОВКА СЕРНИСТЫХ МАЗУТОВ К  
СЖИГАНИЮ В ТОПКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
КОТЛОВ**

Subscribe to print 14/12/2018. Format 60×90/16.  
Edition of 300 copies.  
Printed by “iScience” Sp. z o. o.  
Warsaw, Poland  
08-444, str. Grzybowska, 87  
info@sciencecentrum.pl, <https://sciencecentrum.pl>



ISBN 978-83-66216-05-1

