

Щ Н И Д И

9136  
1/257

**ГАЗИФИКАЦИЯ  
ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ**

**21**

М А Ш Г И З • 1 9 5 2

МИНИСТЕРСТВО ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ СССР  
ГЛАВЛОКОМОБИЛЬДИЗЕЛЬ  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ДИЗЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ  
ЦНИДИ

Л. К. КОЛЛЕРОВ

9.136  
Л. 257

# ГАЗИФИКАЦИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ  
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ  
ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

*Под редакцией В. В. НИКИФОРОВА*

21



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

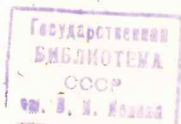
Монография посвящена некоторым вопросам применения теории подобия и моделирования при исследовании и расчете газогенераторных установок.

В работе дан анализ объектов моделирования в газогенераторной установке, приведены указания о расчете, конструировании моделей и технике измерений при моделировании.

Приведено изложение результатов изучения движения газа и воды в элементах газогенераторной установки, моделирования засыпки топлива в газогенераторе и газового потока в слое.

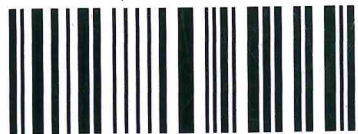
Проведенная работа представляет первую попытку в постановке вопроса о приложении теории подобия к газогенераторным силовым установкам для лучшего раскрытия сущности протекающих процессов и улучшения тепловых и конструктивных показателей установок.

Книга может быть рекомендована для специалистов, работающих в области газогенераторной техники.



52-73716

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА  
Редакция литературы по машиностроению  
Заведующий редакцией инж. Ф. И. ФЕТИСОВ



2011036249

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди энергетических установок с двигателями внутреннего сгорания в народном хозяйстве Советского Союза значительное место занимают газомоторные установки. В двигателях этих установок вместо жидкого топлива используется силовой газ, получаемый в результате газификации в газогенераторе твердого топлива (древесина, торф, уголь и др.).

Твердые топлива (в большинстве добываемые на месте потребления) значительно повышают экономичность эксплуатации газомоторных установок, не зависящих от транспортировки дальнего привозного топлива.

Советский Союз в настоящее время располагает рядом таких установок, специализированных в зависимости от назначения и условий эксплуатации:

- 1) Транспортные установки (самоходные-тяговые: водного транспорта, авто-тракторные и железнодорожные).
- 2) Передвижные установки (не самоходные) на колесах или полозьях.
- 3) Стационарные установки.

Однако развитие всех отраслей социалистического народного хозяйства, организация новых производств, применение новых видов твердого топлива, появление новых типов двигателей внутреннего сгорания и повышение мощностей двигателей, уже находящихся в эксплуатации за счет наддува и повышения числа оборотов, предъявляют требования к созданию новых, более совершенных и производительных газогенераторных установок. И действительно, как в годы Великой Отечественной войны, так и в послевоенные годы создаются новые типы газогенераторных установок на производстве, в научно-исследовательских институтах и заводских конструкторских бюро.

Путь создания новых конструкций газогенераторных установок обычно определяется следующими этапами: а) расчет и проектирование установки, б) создание опытного образца в натуральную величину, в) испытание опытного образца и его доводка, г) постройка опытной серии.

Расчет установки ограничивается тепловым и конструктивным расчетом.

Общезвестно, что сложность процессов газификации и зависимость их протекания от различных факторов препятствуют созданию

\*

достаточно надежного метода расчета, основанного на теории химического равновесия. В связи с этим практически большее значение имеет не расчет химико-физической стороны процесса газификации, а расчет таких показателей газификации, как выход газа, расход воздуха и др. При этом исходными данными является не только состав твердого топлива, но и состав газа, принимаемый по результатам исследований лабораторных или промышленных установок.

Конструктивные параметры обычно принимаются на основе опыта работ ранее созданных установок или рассчитываются на основе эмпирических соотношений.

Сложные вопросы теплообмена, движения газов в слое, гидродинамика слоя в зависимости от размера кусков топлива, термическая подготовка топлива в бункере и другие вопросы при проектировании газогенератора не анализируются расчетным путем.

Таким образом, расчет газогенератора в таком виде, как он осуществляется в настоящее время, естественно, не удовлетворяет современным требованиям.

Если удачно подобраны параметры (не рассчитаны), то генератор дает устойчивый процесс с газом удовлетворительного качества. Если же пробные пуски установки не удовлетворительны, начинается последовательная доводка ее параметров. Однако и в этом случае часто обходятся только получением удовлетворительного по качеству показателя, не имея возможности выявить истинные причины, обеспечивающие успех доводочных испытаний.

Действительно, несмотря на кажущуюся на первый взгляд простоту, рабочий процесс в газогенераторе представляет сложный комплекс тепловых, химико-физических и гидродинамических явлений; верно, они могут быть выражены соответствующими уравнениями, однако решение этих математически сложных уравнений не всегда возможно, а в случае решения результаты в большинстве случаев расходятся с опытными данными и, следовательно, не могут быть признаны надежными.

Такое положение, выявившееся не только с расчетом и исследованием газогенераторных установок, но и других машин и теплообменных устройств, естественно, выдвигало требование к поискам новых методов исследования.

Сравнительно недавно в теплотехнике возник и теперь уже окреп метод исследования тепловых агрегатов, неразрывно связанный с теорией подобия. Этот метод положил начало новому, весьма плодотворному направлению в теплотехнике, которое получило название физической теплотехники.

Основной методологический принцип физической теплотехники заключается в увязке опытного исследования того или иного теплового явления с его физико-математическим описанием, что обуславливает строго научную постановку лабораторного эксперимента и устанавливает область его закономерного распространения.

Теория подобия утверждает, что, при соблюдении известных условий, можно в уменьшенной по размерам копии какого-нибудь

теплового устройства, в котором движется другая среда (например, вместо газа — вода), получить полное или приближенное подобие картины движения газа по каналам.

Если, предположим, в модели мы достигли гидравлического подобия для какой-либо части шахты газогенератора, очистителя или другого устройства, то на модели можно определить сопротивление или, при соблюдении правил теплового подобия, получить, например, коэффициенты теплопередачи для газовых охладителей и применить их в рабочем натуральном устройстве.

Созданный в СССР [1] метод моделирования в настоящее время является основным методом научного исследования и широко используется во многих областях науки и техники.

Этот метод наиболее широко отвечает на вопросы практики, как метод научного исследования, как метод оценки эффективности технического устройства. Возможности этого метода исключительно разнообразны и особенно широки в различных областях машиностроения и химической технологии.

В связи со всем сказанным данная монография представляет собою попытку обобщения и экспериментального обоснования путей применения теории подобия и моделирования к расчету и исследованию элементов газогенераторных установок, производящих силовой газ для двигателей внутреннего сгорания.

*Автор*

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ КАК ОСНОВА ЭКСПЕРИМЕНТА

#### Общие понятия о подобии явлений

Подобными называются явления, у которых отношение характеризующих их величин является числом постоянным. Теория подобия указывает, как надо ставить то или иное наблюдение или исследование и как его обрабатывать для того, чтобы результаты опыта можно было применить ко всем явлениям, подобным исследованному.

Таким образом, теория подобия является важнейшим связующим звеном между теорией и опытом, представляя по существу синтез того и другого. В основе теории подобия лежит идея преобразования переменных величин, изменение которых определяется заданными дифференциальными уравнениями и условиями однозначности. Эта идея связывает теорию подобия с теорией непрерывных групп преобразований, которая разработана математиком С. Ли и описана М. В. Кирпичевым и П. К. Конаковым [2].

Если поставить вопрос о том, в каких случаях может осуществляться подобие, например, в применении к физическим явлениям, то оказывается, что, кроме необходимости подобия геометрических систем, должны быть подобны друг другу и одноименные физические величины, характеризующие явления.

Таким образом, кроме необходимости подобия сходственных величин, в подобных системах существует еще дополнительное условие, заключающееся в том, что фактически два подобных явления могут существовать только тогда, когда некоторые другие комплексы, состоящие из величин, называемых критериями подобия, имеют в обоих явлениях одинаковые численные значения.

Если одноименные величины измерить в так называемых относительных единицах, то во всех подобных явлениях их можно сделать численно одинаковыми. В этом случае за единицу измерения каждой величины выбирают ее значение в произвольной точке рассматриваемой системы. При исследовании, например, движения газа в модели скруббера за единицу скорости следует принимать скорость газа в какой-либо точке скруббера, а за единицу длины — его диаметр, или длину определенного участка и, наконец, за единицу времени — время движения газа через данный участок.

Если через  $v'$  обозначить величину одного наблюдаемого явления, а через  $v''$  — другое явление, подобное первому, то, например, для скоростей газа в любой сходственной точке можно написать, что

$$\frac{v''}{v'} = \frac{v_0''}{v_0'} \quad (1)$$

Здесь  $v_0''$  и  $v_0'$  — скорости, выбранные за единицу измерения.

Выражение (1), на основе правила пропорций, можно преобразовать так:

$$\frac{v'}{v_0'} = \frac{v''}{v_0''} \quad (2)$$

Здесь  $\frac{v'}{v_0'}$  — скорость газа в первой системе, выраженная в относительных единицах;

$\frac{v''}{v_0''}$  — скорость газа во второй системе, выраженная в относительных единицах.

Нетрудно заметить, что скорости оказываются одинаковыми. В связи с этим мы можем отбросить значки от букв приведенных уравнений, обозначающие величины в относительных единицах, и одинаковой буквой  $v$  обозначить скорость.

Для рассматриваемого случая  $v$  и будет являться инвариантом подобия, или критерием.

Таким образом, необходимость численно одинаковых критериев подобия и подобие сходственных величин есть главное условие, при котором может существовать подобие явлений.

### Три теоремы подобия

Вывод, выраженный для критериев подобия, составляет первую теорему подобия, которая, для случая движения твердых тел, была впервые сформулирована еще Ньютоном в 1686 г. Седьмой отдел второй книги „Principia“ начинается двумя предложениями, в которых Ньютон дает строгое определение механического подобия и доказывает две теоремы, устанавливающие необходимые условия подобия движения твердых тел.

В 1874 г. проф. В. Л. Кирпичев успешно применил принцип подобия при исследовании упругих явлений, а в 1915 г. появилась работа Г. А. Афанасьевой-Эренфест [3], посвященная гомогенным функциям и имеющая непосредственное отношение к первой теореме подобия.

В общей форме первая теорема подобия утверждает, что „подобные явления имеют одинаковые критерии“ и что при постановке эксперимента необходимо измерять все величины, из которых составляются эти критерии.

Каков же способ нахождения критериев?

„Уравнение, выражающее закон, которому подчиняется явление, надо представить в безразмерном виде, разделив все члены его на какой-нибудь из них. После этого остается в каждом члене заменить входящие в него величины теми одноименными им, которые приняты за масштабы относительных координат“ [4].

Если первая теорема подобия дает ответ на вопрос, какие величины следует измерять в опыте, то вторая теорема подобия показывает, как необходимо обрабатывать результаты опыта.

По своему содержанию вторая теорема подобия доказывает возможность приведения физических уравнений к виду критериев, устанавливая, что между ними существует однозначная зависимость.

Указанное было впервые высказано Д. Рябушинским в 1911 г. В том же году Федерман дал наиболее полный вывод второй теоремы подобия [5 и 6].

Содержание второй теоремы подобия, исходя из работы М. В. Кирпичева и А. А. Гухмана „Применение теории подобия к опыту“ [7], может быть сформулировано следующим образом: „Подобны те системы, условия однозначности которых подобны, а критерии, составленные из условий однозначности, численно одинаковы“.

Таким образом, вторая теорема подобия, устанавливая требования, при соблюдении которых системы становятся подобными, предполагает, что величины, входящие в условия однозначности, подобны, а критерии инвариантны.

В связи с этим необходимо различать определяющие критерии, составленные только из величин, входящих в условия однозначности, и определяемые, составленные из других величин.

Для того чтобы соблюсти условия подобия, необходимо, чтобы определяющие критерии были инвариантны, при этом определяемые критерии становятся инвариантными автоматически, как следствие установившегося подобия.

В своем современном виде вторая теорема подобия широко используется при обработке результатов экспериментального изучения тепловых и гидродинамических явлений и по своей совокупности с первой теоремой подобия представляет по существу теоретическое обоснование эксперимента.

Если вторая теорема подобия формально и позволяет результаты опыта перенести на все подобные явления, однако отсутствие способа распознавания подобных явлений лишает развитие опыта практического смысла.

Условия, достаточные для осуществления подобия заданного множества явлений, устанавливает третья теорема подобия, имеющая важное значение во всех случаях, когда объектом исследования служат машины и технические сооружения.

В этих условиях третья теорема подобия используется для нахождения способа подобия объекта исследования натуре, принятой за образец.

В силу условий применения третья теорема подобия называется в технике теоремой моделирования.

### Метод теплового моделирования

Метод теплового моделирования получил в СССР широкое развитие в изучении тепловых машин и различных тепловых устройств. Необходимость ясной формулировки условий однозначности происходящих явлений в тепловых устройствах послужила поводом к более глубокому изучению теории подобия и привела к выводу теоремы моделирования. Зарождение метода теплового моделирования связано с работой академика М. В. Кирпичева „О теплопередаче в паровых котлах“ [8], в которой была впервые высказана мысль о возможности изучения работы тепловых устройств на уменьшенных моделях и приведены основные методы моделирования.

В дальнейшем проведение опытов на моделях и промышленных устройствах подтвердило правильность этой идеи, были уточнены условия моделирования, которые позже были сформулированы в виде третьей теоремы подобия (теоремы Кирпичева).

Богатый материал, накопленный по тепловому моделированию, был обобщен в работе М. В. Кирпичева и М. А. Михеева „Моделирование тепловых устройств“ [9], удостоенной Сталинской премии.

Развитие практики моделирования шло параллельно с развитием теории, в которой достижения русской науки намного превосходили зарубежные. В наше время развитие теории моделирования возглавляется академиком М. В. Кирпичевым, который совместно со своими учениками не только доказал третью теорему подобия и условия приближенного моделирования, но и расширил значение теории подобия до теории эксперимента, до теории научных методов исследования.

Метод моделирования позволил распространить результаты единичного опыта по изучению какого-либо явления на целую группу явлений, подобных исследованному, и, таким образом, устранил сковывавшие экспериментатора рамки ограниченности результатов единичного эксперимента и предоставил ему право распространять результаты опыта на случаи, для которых начальные и краевые условия и значения физических параметров полностью не совпадают.

В такой постановке вопроса мы вправе исследуемое явление рассматривать как модель для целой группы подобных явлений, а под моделированием понимать „осуществление такого явления, в котором поля всех физических переменных подобны полям соответствующих переменных в моделируемом явлении“.

На первых этапах применения моделей к исследованию движения газов, в силу несоблюдения подобия движения, в модели и образце

получались ошибочные выводы. Для точного соответствия движения газа в модели образцу одним из главных условий моделирования является равенство числа Рейнольдса в модели числу Рейнольдса в образце, т. е.

$$\frac{\omega' l'}{\nu'} = \frac{\omega'' l''}{\nu''} \quad (3)$$

откуда скорость в модели:

$$\omega'' = \omega' \frac{l'}{l''} \cdot \frac{\nu''}{\nu'} \quad (4)$$

Если в модели и образце протекает газ одного и того же состава (тогда  $\nu' = \nu''$ ) и модель построена в масштабе  $1/10$ , тогда  $l' = 10 l''$ , или

$$\omega'' = 10 \omega' \quad (5)$$

Это значит, что для удовлетворения условию (3) скорость газа в модели надо не уменьшать, а увеличивать во столько раз, во сколько раз меньше взяты геометрические размеры модели.

Формулируя основные закономерности теории подобия в приложении к моделированию, перечислим основные требования, предъявляемые к модели.

1. Геометрическое подобие — осуществляется изготовлением модели, точно воспроизводящей конфигурацию сечений исследуемых элементов (колосники, трубы, скрубберные решетки и др.).

2. Геометрическое подобие входного участка газа или жидкости в модели к образцу. При этом необходимо учитывать два свойства вязкой жидкости (вода, воздух, генераторные и дымовые газы и др.) — стабильность и автомодельность.

Под стабильностью потока вязкой жидкости понимают способность потока устанавливать всегда одно и то же распределение скоростей по сечению независимо от того, какова была картина скоростей во входном сечении.

Под автомодельностью потока вязкой жидкости понимают способность жидкости при ее движении со скоростью ниже критической (ламинарное движение) при всех расходах иметь распределение скоростей в поперечном сечении трубы по параболе независимо от величины средней скорости. Труба в этом случае является по существу сама себе моделью, или, как говорят, явление становится „автомодельно“. Картина скоростей, начиная с величины чисел Рейнольдса, в 5—6 раз больших критического, хотя и меняется, но незначительно, в связи с чем в автомодельной области нет необходимости соблюдать условия равенства критерия  $Re$  в образце и модели. Точно так же в автомодельной области нет необходимости соблюдать и подобие полей вязкости, так как в части кинематического подобия в области турбулентного режима ( $Re > Re_{\text{прит.}} = 2000$ ).

величина вязкости играет небольшую роль по сравнению с инерционными силами потока.

В случае моделирования медленного движения газа, при наличии струй разной плотности, кроме числа  $Re$ , определяющим критерием является еще  $A_r = \frac{w^2}{al}$ . В этом случае моделирование явления жидкостью постоянной плотности не представляется возможным и потому переходят на так называемые „холодные“ водяные и воздушные модели.

3. Подобие физических параметров является одним из наиболее сложных условий моделирования тепловых аппаратов, при которых необходимо, чтобы физические параметры в модели менялись подобно образцу. Иными словами: „физические явления считаются подобными, если они протекают в геометрически подобных системах и при этом поля всех одноименных физических переменных, участвующих в явлениях, соответственно подобны“. Трудность осуществления указанных условий приводит практически к осуществлению изотермического процесса, соответствующего среднему состоянию газов в образце и модели.

4. Моделирование требует также однозначности определяющего критерия Рейнольдса ( $Re' = Re''$ ) для сходственных точек модели и образца.

Как следствие является равенство второго (неопределяющего) критерия Эйлера:

$$Eu' = Eu'', \quad (6)$$

или

$$\frac{\Delta_p'}{\rho' w'^2} = \frac{\Delta_p''}{\rho'' w''^2}, \quad (7)$$

где  $\Delta_p'$  и  $\Delta_p''$  — гидравлическое сопротивление на сходственных участках образца и модели.

Уравнение (7) дает возможность по найденному значению критерия Эйлера для модели ( $Eu''$ ) найти гидравлическое сопротивление ( $\Delta_p'$ ) образца, а именно:

$$\Delta_p' = Eu'' \rho' w'^2, \quad (8)$$

или

$$\Delta_p' = \Delta_p'' \cdot \frac{\rho' w'^2}{\rho'' w''^2}. \quad (9)$$

В случае моделирования изотермического процесса все условия подобия легко выполнимы. В противном случае условия подобия выполняются приближенно, однако, как показывает опыт, получаемые данные находятся в допустимых для опыта пределах.

На основании вкратце изложенной сущности метода моделирования, следует считать, что моделирование может, по существу, преследовать две цели: либо воспроизведение на модели явлений, подобных в уже существующем образце, либо изучение свойств впервые запроектированного устройства. Как в том, так и другом случаях следует подчеркнуть главное преимущество моделирования, дающее возможность обобщить результаты исследования и распространить их на все явления, подобные исследованному. Заканчивая на этом рассмотрение некоторых основных положений моделирования, перейдем к объектам моделирования в конкретной области — в газогенераторных установках, которым и посвящена данная монография.



## ГЛАВА ВТОРАЯ

### ОБЪЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

При проектировании и исследовании газогенераторных установок внимание проектанта и исследователя сосредотачивается в основном на трех элементах: газогенераторе, системе очистки генераторного газа и системе его охлаждения [10 и 11].

Эти три основных элемента газогенераторной установки, конструктивно выполняемые различно, в зависимости от мощности (производительности) и назначения, в целом определяют и технологическую схему газогенераторной установки.

При проектировании новых конструкций газогенераторных установок не все ее элементы могут быть точно рассчитаны. Часть этих элементов конструктивно принимается подобной уже действующим и проверенным практикой установкам, часть расчетно проверяется, часть же, не поддающаяся расчету, принимается по соображениям автора конструкции.

Теория подобия и метод моделирования могут в значительной мере облегчить задачу создания новых конструкций газогенераторных установок и восполнить ту часть теплового и конструктивного расчета, которая на сегодня еще не имеет широко проверенной практикой теоретической базы. Учтя опыт современной работы, постараемся, с точки зрения экспериментальных и расчетных возможностей, подойти к выбору объектов моделирования в газогенераторной установке.

#### О процессах, протекающих в газогенераторе

Процессы, протекающие в газогенераторе, складываются из нагрева, сушки и сухой перегонки топлива и взаимодействия воздуха и продуктов разложения с углеродом топлива.

Указанные процессы определяются: а) реакциями газификации, б) теплообменом в слое топлива и ходом процесса его подсушки и сухой перегонки и в) аэродинамическими характеристиками слоя топлива.

Скорость физико-химического гетерогенного процесса при газификации твердого топлива определяется деятельностью химической реак-

ции на поверхности топлива и процессами диффузии, которые протекают не только в свободном газовом пространстве, но, при наличии пор и трещин на поверхности топлива, распространяются и в глубину. Следует при этом указать, что в диффузной области скорость процесса не зависит от механизма химической реакции и в основном определяется скоростью газового потока. Влияние температур здесь невелико и определяется изменением таких констант, как коэффициент диффузии, кинематической вязкости и других. Если, в определенных условиях, наиболее медленной стадией процесса газификации твердого топлива является химическая реакция, то суммарная скорость процесса определяется истинной кинетикой данной химической реакции. При переходе реакции в кинетическую область скорость химической реакции становится меньше скорости диффузии. Поток воздуха, поступая в слой топлива, движется в межкусковых его пространствах, интенсивно перемешиваясь с газами, в силу чего „зона газификации газогенератора представляет область диффузионных процессов в турбулентном потоке“. При этом важно отметить, что скорость диффузии вещества в турбулентном потоке пропорциональна скорости движения потока около реагирующей поверхности и пропорциональна коэффициенту потери напора.

Критерий подобия диффузии в турбулентном потоке равен

$$\frac{4Dz}{s^2}, \quad (10)$$

где  $D$  — коэффициент турбулентной диффузии в  $см^2/сек$ ;

$z$  — время смешения, равное  $\frac{l}{w}$  сек.;

$s$  — толщина одной струи газа и воздуха в  $см$ .

Если мы переходим на другой размер кусков топлива при неизменном диаметре камеры газификации и той же ее производительности и, таким образом, меняем размер межкускового пространства (диаметр струи), то имеем:

$$l = ms^2, \quad (11)$$

$$W = \frac{v}{\frac{\pi s^2}{4} n} = \text{const}; \quad ns^2 = \text{const}; \quad l = \frac{k}{n}, \quad (12)$$

где  $n$  — число газовых струй;

$m$  и  $k$  — постоянные.

Таким образом, чем больше в слое топлива каналов, т. е. чем число протоков (струй) больше [12], тем меньше длина пути использования кислорода и восстановления углекислоты в слое кускового топлива.

Рассмотрение газификации твердого топлива, как процесса диффузии через газовую пленку [13 и 14], вместе с процессами параллельно протекающих химических реакций, дает возможность подойти к расчету высоты активной зоны газогенератора и ее площади поперечного сечения.

Если толщину газовой пленки принять равной

$$\delta = \frac{Dg(C_0 - C_1)t}{n}, \quad (13)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии кислорода через воздушную пленку, равный  $0,178 \text{ см}^2/\text{сек}$  при  $0^\circ$  и  $760 \text{ мм рт. ст.}$ ;

$g$  — площадь поверхности кусков топлива в  $\text{см}^2$ .

Величина  $g$  определяется:

$$g = \frac{\xi v_r 10^4}{10^6} = 0,01 b v_r \text{ см}^2, \quad (14)$$

где  $v_r$  — объем камеры газификации в  $\text{см}^3$ ;

$\xi$  — величина активной поверхности топлива в  $\text{м}^2$  на  $1 \text{ м}^3$ .

Так как

$$v_r = FH \cdot 10^6 \text{ см}^3, \quad (15)$$

где  $H$  — высота активной зоны в  $\text{м}$ ;

$F$  — площадь поперечного сечения камеры в  $\text{м}^2$  и равна

$$F = \frac{L_0 Q'_{\text{газ}} (t + 273)}{273 \cdot 3600 \mu v_{\text{кр}}} \text{ м}^2, \quad (16)$$

где  $L_0$  — количество первичного воздуха, необходимого для образования  $1 \text{ м}^3$  сухого газа в  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$Q'_{\text{газ}}$  — часовой отбор газа в  $\text{м}^3/\text{час}$ ;

$\mu$  — коэффициент заполнения сечения (для чурок нормального размера  $= 0,532$ );

$v_{\text{кр}}$  — критическая скорость воздуха в  $\text{м}/\text{сек}$ .

Тогда

$$g = bFH \cdot 10^4, \quad (17)$$

и

$$\delta = \frac{DbFH(C_0 - C_1)t \cdot 10^4}{n}, \quad (18)$$

а высота зоны  $H$  будет равна

$$H = \frac{\delta n}{DbF(C_0 - C_1)t \cdot 10^4}.$$

Диффузионные процессы, будучи непосредственно связаны с установлением расчетных показателей процесса газификации твердого топлива, как процессы физико-химических превращений, могут быть моделированы.

## Моделирование физико-химических превращений

Общая теория подобия процессов физико-химических превращений и принципы их приближенного моделирования были разработаны в СССР в 1942—1947 гг. [15 и 16].

Отличительной чертой этой теории является рассмотрение процессов физико-химического превращения и переноса вещества и энергии в их совокупности. Условия подобия устанавливаются здесь на основании закона действующих масс, предполагая их справедливость и для промежуточных стадий сложных превращений. Уравнение скорости превращения может быть представлено в следующем безразмерном виде:

$$\frac{\alpha_i U_n}{U_{b_1} U_{b_2}} = 1 - \frac{\frac{k_2}{k_1}}{\frac{C_1^{a_1} C_2^{a_2} \dots}{C_1^{b_1} C_2^{b_2} \dots}}, \quad (19)$$

где  $U_n$  — результирующая скорость превращения;

$U_{b_1}, U_{b_2}$  — внутренние скорости восстановления термодинамического равновесия;

$k_1, k_2$  — кажущиеся константы скорости прямого и обратного процессов;

$C$  — концентрация;

$a_1 \dots, b_2 \dots$  — неизвестные показатели, величина которых обусловлена механизмом реакции;

$\alpha_1$  — стехиометрический коэффициент;

$\frac{k_2}{k_1} = k$  — константа термодинамического равновесия.

Суммарная скорость процесса определяется не только химическими реакциями и кинетикой, но и процессом переноса вещества и энергии, который для стационарных условий может быть выражен следующими уравнениями:

$$\alpha_i U_n = -\text{div}(v C_i) + \text{div}(D_i \text{grad } C_i), \quad (20)$$

$$\alpha_i U_n q = -\text{div}(C_p \rho \vartheta v) + \text{div}(\lambda \text{grad } \vartheta), \quad (21)$$

где  $v$  — скорость тока;

$C_p$  — теплоемкость;

$\rho$  — плотность;

$\vartheta$  — температура;

$D$  — коэффициент диффузии;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности;

$q$  — тепловой эффект реакции.

Невозможность точного подобия процессов физико-химических превращений [15 и 16] привела к формулировке предельных случаев условий их подобия.

1. Если процесс в целом термодинамически равновесный, то локальный критерий химического подобия  $Pa$  равен:

$$Pa = \frac{k}{\frac{C_{A_1}^{\alpha_1} C_{A_2}^{\alpha_2} \dots}{C_{B_1}^{\beta_1} C_{B_2}^{\beta_2} \dots}} = 1. \quad (22)$$

2. Если превращение неравновесное, а процессы обмена равновесные, то процесс термически и гидродинамически инвариантен, а критериальное уравнение сохраняет в себе только критерий химического подобия, т. е.

$$Pa = f(k_0 \dots). \quad (23)$$

3. Если превращение термодинамически равновесное, а процессы обмена неравновесные (область диффузионных процессов), то уравнение не содержит определенных критериев химического подобия.

Кинетика таких процессов зависит только от процессов переноса вещества и энергии:

$$Pa = f(Re, Pr, Pr' \dots). \quad (24)$$

Температуры, развивающиеся в реакционных зонах газогенератора, зависят от скорости и характера газового потока и соотношения между приходом и расходом тепла. Приходными статьями тепла являются: а) теплота экзотермических реакций, б) физическая теплота участвующих в реакции веществ и в) теплота, получаемая вследствие теплопередач от тел с более высокой температурой.

Расходные статьи тепла следующие: а) теплота, поглощенная в результате эндотермических реакций, б) теплота на испарение воды, в) потери конвекции и лучеиспускания и г) физическое тепло отходящих газов.

Теплота реакций представляет общий приход или расход тепла в результате течения химического процесса, при этом температура системы до и после реакции должна быть одинакова, т. е. выделившееся или поглощенное в реакции тепло не должно пойти на изменение температуры системы.

Температуры газов в пределах кислородной зоны достигают максимума, несколько снижаясь в восстановительной зоне.

Составление теплового баланса кислородной зоны является задачей исключительно сложной и практически ограничивается упрощенными вычислениями на основе усреднения температур газов и топлива.

В одинаковой степени сложен расчет теплообмена в зонах термической подготовки топлива в газогенераторе (подсушка и сухая перегонка). Здесь, по мере опускания слоя топлива в более нагретые зоны, меняется размер, вес кусков топлива и их состав. Меняется и состав газов за счет различной степени примешивания паров смол и прочих парообразных и газообразных летучих.

Из теории подобия известно, что безразмерные отношения

$$\frac{\vartheta_z - t_n}{\vartheta_z - t_0} \text{ и } \frac{\vartheta_z - t_c}{\vartheta_z - t_0} \quad (25)$$

являются не чем иным, как критериями Био и Фурье, а теплоотдача от газов и поверхности тела — функцией критериев Нуссельта и Рейнольдса. Отсюда следует, что прогрев топлива зависит от параметров, изменяющихся в стадии нагрева, каковыми являются: теплопроводность и теплоемкость газов и топлива, вязкость и скорость газов и, наконец, размер кусков топлива.

В условиях конвекционной теплоотдачи в слое от газов к топливу коэффициент теплоотдачи определяется в зависимости от критериев

$$Re = \frac{W\gamma\alpha}{g\mu} \quad (26)$$

и

$$Nu = \frac{\alpha_k d}{\lambda_r}, \quad (27)$$

где  $W$  — скорость газов, отнесенная к полному сечению слоя, в м/сек;

$d$  — размер частиц в м;

$\mu$  — вязкость газов в кг·сек/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  — удельный вес газа в кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности слоя в ккал/м<sup>2</sup>·час·град;

$\lambda_r$  — коэффициент теплоотдачи газа в ккал/м<sup>2</sup>·час·град;

$g$  — ускорение силы тяжести (9,81 м/сек<sup>2</sup>).

#### Моделирование гидравлических характеристик

Гидравлическая характеристика реального слоя топлива в газогенераторе является исключительно важным условием ведения генераторного процесса.

Равномерность распределения топлива по сечению газогенератора, однородность его размера, прохождение газа через слой с незначительным сопротивлением — все это совершенно необходимые условия для обеспечения нормальной работы газогенератора.

Характер движения газа через слой топлива, представляющий беспорядочное расположение отдельных кусков (зерен) топлива достаточно сложен и зависит от геометрии отдельных кусков топлива и характеристики всего слоя, как известной геометрической системы.

Движение газо-воздушного потока сквозь пористую засыпку является наиболее существенной частью генераторного процесса, обусловленного законами аэродинамического взаимодействия проходящего воздуха со слоем топлива.

Газо-воздушный поток, попадая в слой топлива, разбивается на большое число отдельных струй, движущихся по очень сложным

траекториям в межкусковых пространствах. Последние представляют каналы неправильной формы с переменным сечением, многократно соединенные между собой. Поэтому физическая (иначе структурная) характеристика слоя может определяться следующими показателями: а) средний размер зерна в слое; б) порозность слоя; в) его шероховатость.

Для условий узкого интервала зернистости средний размер топлива в слое, имея в виду равенство объемов реального и усредненного слоя, будет равен

$$X_m = \sqrt[3]{\frac{2x_1^2 + x_2^2}{x_1 + x_2}}. \quad (28)$$

Порозность является характеристикой плотности слоя пористой засыпки; при этом принимаемый коэффициент порозности устанавливает отношение объема пустот ко всему объему, занимаемому слоем, т. е.

$$m = \frac{\gamma_{\text{каж.}} - \gamma_{\text{нас.}}}{\gamma_{\text{каж.}}}, \quad (29)$$

где  $m$  — коэффициент порозности;

$\gamma_{\text{каж.}}$  — кажущийся удельный вес твердого топлива;

$\gamma_{\text{нас.}}$  — вес единицы объема слоя (насыпной удельный вес).

Если слой топлива в газогенераторе, в зоне подвода воздуха, имеет различную порозность (неравноплотен), то воздух устремляется основной массой по пути наименьшего сопротивления, образует быстро выгорающие местные очаги, и распределение воздуха по сечению резко меняется.

Следовательно, для организации устойчивого процесса газификации топлива первой задачей является обеспечение устойчивости слоя с необходимой и равномерно распределенной порозностью.

Для газогенераторного топлива наиболее важной величиной, характеризующей гидродинамику движения газа в слое, является коэффициент сопротивления.

Для фильтрации газа через слой зернистой засыпки сопротивление слоя  $\Delta_p$  можно определить из следующего уравнения:

$$\Delta_p = \lambda_{\text{сл.}} \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega_{\text{ф.}}^2, \quad (30)$$

где  $\Delta_p$  — сопротивление слоя высотой в  $l$  мм вод. ст. при скорости фильтрации  $\omega$  в м/сек и характерном размере частиц  $d$  в мм;

$\gamma$  — вес газа в кг/м<sup>3</sup>;

$g$  — ускорение силы тяжести;

$\lambda_{\text{сл.}}$  — коэффициент сопротивления слоя, являющийся функцией  $Re_{\text{ф.}}$ ;

$$Re_{\text{ф.}} = \frac{\omega_{\text{ф.}} \cdot d}{\nu}, \quad (31)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость.

Нормальный стационарный режим фильтрации устанавливается в том случае, если скорость фильтрации по условным межкусковым каналам одинакова, равномерна по сечению и соответствует нормальной для данной системы величине сопротивления слоя  $\Delta_p$ .

Совершенно очевидно, что коэффициент порозности  $m$  связан с величиной диаметра  $d$  условного канала между частицами топлива.

По аналогии с движением жидкости в канале можно следующим образом подойти к определению диаметра  $d$  канала в слое для газификации топлива.

Ламинарная область для труб характеризуется критерием Лагранжа, умноженным на  $\frac{d}{l}$  (где  $d$  — диаметр канала,  $l$  — длина канала):

$$\frac{\Delta_p d}{\omega \mu} \cdot \frac{d}{l} = La \frac{d}{l} = 32. \quad (32)$$

Для пористой засыпки этому критерию аналогичен критерий Павловского:

$$Pa = \frac{\Delta_p \delta^2}{Q \mu H} = \frac{\lambda_{\text{сл.}} Re}{2}, \quad (33)$$

величина которого есть величина постоянная в области ламинарной фильтрации только для величины данной порозности.

В случае перехода к другой порозности величина  $Pa = C(m)$  должна определяться экспериментально.

Если нам известен коэффициент порозности  $m$ , то связь между диаметром  $\delta$  зерна топлива и диаметром  $d$  эквивалентного по сопротивлению канала можно найти из соотношения:

$$\frac{\Delta_p d^2}{\omega \mu L} : \frac{\Delta_p \delta^2}{m \omega \mu H} = \frac{32}{C(m)}; \quad (34)$$

здесь

$$\Delta p_1 = \nu p_2 \text{ и } L = H,$$

где  $H$  — высота слоя, для которого справедлива данная величина перепада давления  $\Delta_p$ .

Тогда формула (34) примет следующий вид:

$$d = \delta \sqrt{\frac{32}{C(m) m}}. \quad (35)$$

Несмотря на значительный опытный материал и имеющиеся расчетные формулы, определение гидравлических характеристик слоя топлива в работающем газогенераторе представляет значительные трудности из-за непрерывно меняющейся структуры слоя при сохранении нагрузочного режима газогенератора постоянным.

В то же время известно, что значение величины гидродинамического сопротивления слоя тесно связано с конфигурацией шахты газогенератора (бункер, камера газификации), а пользуясь расчетной методикой, не представляется пока еще возможным задать такую геометрию шахты, в которой гидравлическая характеристика топлива

удовлетворяла бы полностью требованиям и стабильности режима процесса.

В этих условиях применение метода моделирования для изучения гидравлических сопротивлений подвижного и неподвижного слоя топлива в газогенераторах с различными геометрическими характеристиками бункера камеры и золосбрасывающих устройств является исключительно ценным при создании новых конструкций газогенераторов.

При изучении гидравлических сопротивлений на моделях, полученные данные, для распространения их на образец, должны быть обработаны в виде функциональной зависимости между критериями подобия:

$$Eu = f(Re). \quad (36)$$

Вид этой функции не может быть предсказан теоретически. Задачей эксперимента является определение ее вида для каждой группы геометрически подобных систем. Подставив выражение для критериев, равенство (36) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{\Delta p}{\rho w^2} = f\left(\frac{\rho w d}{\mu}\right). \quad (37)$$

Гидравлическое сопротивление различных систем принято рассчитывать по выражению:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho w^2}{2}, \quad (38)$$

где  $\zeta$  — коэффициент сопротивления, пропорциональный критерию Эйлера.

Сопоставляя эту формулу с равенством (36), видим, что

$$2Eu = \zeta. \quad (39)$$

Формула для расчета сопротивления в случае движения потока внутри канала длиной  $l$  при диаметре  $d$  имеет вид:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2}. \quad (40)$$

Коэффициент сопротивления трения  $\lambda$  в этом случае выражается через критерий Эйлера следующим образом:

$$\lambda = 2Eu \frac{d}{l}. \quad (41)$$

В случае, если при проведении эксперимента замеряется гидравлическое сопротивление между участками, площади которых сильно отличаются одна от другой, то в замеренный перепад необходимо вводить поправку на изменение кинетической энергии, вследствие изменения скорости:

$$\Delta p \left[ \rho_1 + \frac{\rho_1 w_1^2}{2} \right] - \left[ \rho_2 + \frac{\rho_2 w_2^2}{2} \right]. \quad (42)$$

## Моделирование загрузки в газогенераторе

Если через  $D$  и  $d$  обозначить размеры частиц топлива, через  $\Gamma$  и  $\gamma$  удельный вес загрузки в образце и модели, а через  $m_v$  и  $m_\gamma$  — масштабные множители для размера частиц и удельного веса, то тогда будем иметь следующие отношения подобия:

$$D = m_\gamma d, \quad (43)$$

$$\Gamma = m_\gamma \gamma, \quad (44)$$

которые указывают, что соответствующие веса

$$G = D^3 \Gamma, \quad (45)$$

$$g = d^3 \gamma \quad (46)$$

переносятся на модели по масштабу:

$$m_g = m_d^3 m_\gamma. \quad (47)$$

Если после просеивания первоначального веса загрузки  $g_0$  на сите с размером ячейки  $d$  остается вес загрузки модели  $g$ , то, взяв вес истинной загрузки

$$C_0 = m_g g_0 \quad (48)$$

и пропустив его через сито с диаметром ячейки, равным

$$D = m_d d, \quad (49)$$

получим вес истинной загрузки, остающейся на сите,

$$C = m_g g. \quad (50)$$

Средний диаметр отверстия в сите, удерживающий в результате просеивания загрузки половину первоначального ее веса, будет, очевидно, равен для модели

$$D_m = m_d d_m. \quad (51)$$

Средний диаметр отверстия может быть определен также и иным способом: из выражений (49, 51)

$$\frac{D}{D_m} = \frac{d}{d_m} \quad (52)$$

и из выражений (48, 50)

$$\frac{C}{C_0} = \frac{g}{g_0}. \quad (53)$$

Отношения

$$\frac{C}{C_0} = f\left(\frac{D}{D_m}\right) \text{ или } \frac{g}{g_0} = f\left(\frac{d}{d_m}\right)$$

есть не что иное, как безразмерная характеристика или критерий просеивания загрузки.

Для образца и модели безразмерные характеристики просеивания должны быть одинаковы для всех горизонтов и точек, что необходимо помнить при расчете модели и ее исследовании.

В результате разбора некоторых элементов рабочего процесса газогенератора, можно наметить следующие объекты моделирования при исследовании работы газогенератора и создании новых конструкций:

- а) моделирование физико-химического процесса;
- б) моделирование теплопередачи в слое;
- в) моделирование гидравлических характеристик слоя, распределения топлива на колосниках, работы топливозагрузочных устройств и шуровочных приспособлений;
- г) моделирование аэродинамики и распределения в слое фурменного воздуха;
- д) экспериментальное исследование на моделях радиальных характеристик фурм и коэффициентов сопротивления;
- е) моделирование камер газификации с точки зрения аэродинамики и выбора наиболее выгодных ее размеров.

#### Моделирование охлаждения и очистки газа

Газ по выходе из газогенератора проходит процесс охлаждения и очистки.

Охлаждение газа и его предварительная грубая очистка осуществляются в зависимости от назначения, типа и условий эксплуатации газогенераторной установки в поверхностных воздушных охладителях или скрубберах.

В стационарных газогенераторных установках чаще всего устанавливаются скрубберы и фильтры сухой очистки. В передвижных или в небольших стационарных установках, часто в связи с условиями эксплуатации, технологическая схема очистки и охлаждения газа устанавливается следующая: циклон — воздушные охладители, грубый фильтр или воздушные охладители и тонкий фильтр.

Таким образом, типичными агрегатами системы очистки и охлаждения генераторов газа в силовых установках являются: циклонный пылеуловитель, скруббер, барботажно-жидкостные очистители, воздушные охладители газа и фильтр тонкой очистки газа. Выбор сочетаний агрегатов охлаждения и очистки газа определяется условиями эксплуатации и конструктивными соображениями.

Циклоны, вентиляторы разжига и теплообменные аппараты в газогенераторной установке являются исключительно благоприятными объектами для моделирования, которое в значительной мере упрощает задачу создания наиболее рациональных конструкций этих устройств. Остановимся на моделировании циклонных пылеуловителей.

Первые работы с циклонами показали, что для их исследования вполне применим метод моделей, дающий на них те же характеристики, что и в натуре. Опыт, проведенный на стеклянных моделях (фиг. 1) в  $1/40$  и  $1/10$  натуральной величины, подтвердил идентичность

кинематической картины, а подкрашивание потока позволило сфотографировать ряд моментов, дающих представление о характере циклонного потока.

Модель циклона дала возможность изучить влияние различных приспособлений на процесс пылеосаждения, как-то: козырьков, радиальных успокоителей и др. Визуальные наблюдения над моделью достаточно подтверждаются количественными измерениями коэффициентов сопротивления для характерных участков циклона.

Для случаев, требующих менее точного, но быстрого ответа, целесообразно применять метод исследования на открытой модели, предложенной для этих случаев академиком М. В. Кирпичевым [9].

Метод открытой модели заключается в том, что для случаев плоского движения модель делается горизонтальной и открытой сверху (фиг. 2). Движение воды в этой модели происходит не под напором, как в обычных моделях, а под влиянием образовавшегося уклона свободной поверхности воды. Указанный метод достаточно хорош для рекогносцировочных исследований, при котором ряд деталей может быть устранен или заменен новыми.

Не менее интересные, для практического использования, результаты дает моделирование вентиляторов разжига, широко применяемых в газогенераторной технике.

Первые работы по моделированию в области конструирования вентиляторов появились в 1932 г. [17] и практически полностью подтвердили возможность совпадения напорных характеристик в образце и модели. Если при этом достигается точное их геометрическое подобие, а число Рейнольдса достаточно большое ( $30\,000 \div 40\,000$ ), то результаты исследования достаточно точно отражают характеристики образца.

В применении к вентиляторам число Рейнольдса

$$Re = \frac{ud}{\nu},$$

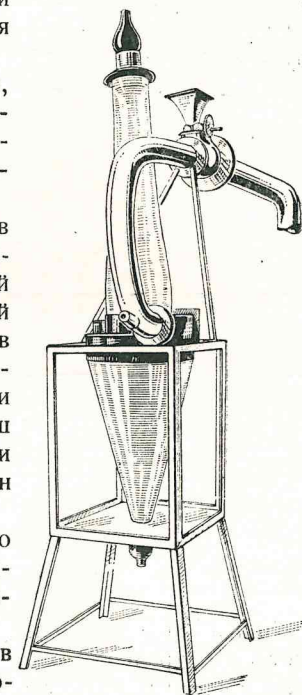
где  $u$  — окружная скорость на наружном диаметре колеса в м/сек;

$d$  — наружный диаметр колеса в м;

$\nu$  — кинематический коэффициент вязкости в м<sup>2</sup>/сек;

Оно может быть записано в виде

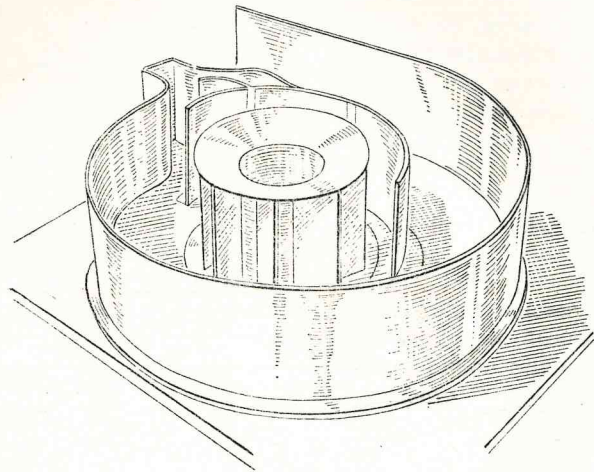
$$Re = \frac{ud^2}{\nu}. \quad (54)$$



Фиг. 1. Прозрачная модель циклона.

При данном масштабе модели можно выбрать такое число оборотов, чтобы  $Re_{\text{мод.}}$  ближе подходило к  $Re_{\text{обр.}}$ , однако практически равенство  $Re_{\text{мод.}} = Re_{\text{обр.}}$  осуществить трудно. Таким образом, как правило,  $Re$  на модели несколько меньше числа  $Re$  в образце.

Экспериментальное исследование на модели новых схем вентиляторов не ограничивается проверкой расчета, а преследует цель использования преимуществ метода моделирования для исследования, например, влияния на параметры вентилятора числа лопаток, их профиля, отношения радиальной длины лопаток к шагу и т. д.



Фиг. 2. Общий вид открытой модели циклона.

Значительных успехов в области моделирования вентиляторов достиг Центральный котлотурбинный институт имени Ползунова. Есть полное основание считать, что в настоящее время результаты модельных испытаний на стенде являются более точными, чем испытания в натуре, в особенности в связи с переходом от аэродинамических труб к воздушным камерам с прецизионно-тарированными коллекторами для измерения расхода и со значительными сечениями, в которых давления измеряются при весьма малых величинах скорости потока.

### Моделирование теплообмена

Применение моделирования при создании теплообменных аппаратов и всевозможного рода комбинированных охладителей-очистителей в газогенераторных установках должно быть широко использовано.

Трудности расчета теплообменных аппаратов в газогенераторных установках определяются рядом переменных величин, к которым следует отнести коэффициенты теплопередачи, загрязнение поверхности, одновременную передачу тепла соприкосновением и излучением и т. д.

Несмотря на то, что сам по себе эксперимент при многих переменных дает мало убедительные результаты, все же постановка на моделях опытов для более узкого круга вопросов представляет большую практическую ценность.

При создании теплообменных аппаратов в газогенераторных установках (воздушные и водяные охладители и др.), главной искомой величиной является коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , который, как известно, определяется следующим уравнением:

$$Q = \alpha F (t_w - t_0), \quad (55)$$

откуда

$$\alpha = \frac{Q}{F (t_w - t_0)}, \quad (56)$$

где  $Q$  — количество тепла в  $\text{ккал/час}$ , переданного за один час;

$F$  — поверхность теплообмена в  $\text{м}^2$ ;

$t_0$  — температура воздуха в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_w$  — температура стенки в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в  $\text{ккал/м}^2\text{час град}$ .

Так как в практике моделирования еще не удалось воспроизвести лучеиспускание газов, то исследование на моделях охватывает лишь коэффициент теплоотдачи соприкосновением  $\alpha_c$ .

Величины, характеризующие теплообмен в вынужденном потоке жидкости, могут быть представлены в виде любой из следующих зависимостей критериев теплового подобия:

$$Nu = f(Re, Pe) \quad (57)$$

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (58)$$

$$Nu = f(Pe, Pr). \quad (59)$$

Здесь  $Nu$  — критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = \text{idem},$$

где  $l$  — размер системы;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в  $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{час}\cdot\text{град}}$ ;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности жидкости в  $\frac{\text{ккал}}{\text{м}\cdot\text{час}\cdot\text{град}}$ ;

$Pr$  — критерий Прандтля — производный критерий, являющийся отношением критерия  $Pe$  к критерию  $Re$  т. е.

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \text{idem};$$

$Pe$  — критерий Пекле

$$Pe = \frac{wl}{a} = \text{idem},$$

где  $w$  — скорость жидкости в  $\text{м/сек}$ ;

$a$  — коэффициент температуропроводности в  $\text{м/час}$ ;

$$a = \frac{\lambda}{C_p \gamma};$$

$C_p$  — теплоемкость жидкости при постоянном давлении  $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ ;

$\gamma$  — объемный вес жидкости в  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Необходимыми условиями теплового подобия при вынужденном движении в сопоставляемых системах (кроме обязательного соблюдения механического подобия) являются:

а) подобие движения среды (жидкости, газа);

б) подобие температурных полей;

в) подобие полей коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  и теплоемкости  $C_p$ ;

г) соблюдение условий  $Pe = idem$  и  $Pr = idem$  или  $Re = idem$  и  $Pr = idem$ .

Для газов требование  $Pe = idem$  соблюдается автоматически.

При выполнении изложенных четырех требований, как следствие, получаем  $Nu = idem$ .

Требование подобия движения жидкостей и газов в моделях теплообменных аппаратов может быть с известной степенью приближения соблюдено; наиболее трудно выполнение требований подобия температурных полей и физических констант.

Однако эти трудности преодолеваются путем создания в модели отдельных (локальных) участков теплового подобия.

Необходимо отметить, что указанный метод правилен только в том случае, если температурное поле потока в локальном участке модели подобно температурному полю такого участка в образце.

### Огневое моделирование

Если при создании газогенераторов небольшой производительности тепловые показатели могут быть всегда проверены экспериментально на лабораторном образце, то при создании газогенераторов большой производительности и больших габаритов постройка специального экспериментального образца и его поверка связаны с большими трудностями.

В подобных случаях значительную помощь может оказать „огневое моделирование“, задачей которого является установление количественных данных о производительности газогенератора, распределении температур, шлаковании, расходе топлива и др.

Впервые теория и пути приближенного огневого моделирования были разработаны Г. П. Иванцевым [15] и в дальнейшем развиты в работах Г. Л. Полякова, А. С. Невского и др.

Оценка системы приближенности огневого моделирования была осуществлена С. Е. Ростовским, применительно к прокатной методической печи с горелками беспламенного горения.

В результате проведенной работы был получен ряд условий моделирования, анализ которых привел к следующим результатам.

Если поддерживать в модели и образце одинаковые температуры

$$t_{\text{мод.}} = t_{\text{обр.}}$$

в связи с чем скорости газа и металла должны быть соответственно равны в модели и образце, тогда

$$(w_g)_{\text{мод.}} = (w_g)_{\text{обр.}}; (w_m)_{\text{мод.}} = (w_m)_{\text{обр.}}$$

Анализ условий подобия показал, что если модель выполнена в  $1/m$  натуральной величины, т. е.

$$\frac{l_{\text{мод.}}}{l_{\text{обр.}}} = C_l = \frac{1}{m}, \quad (60)$$

то для точного моделирования параметры модели должны удовлетворять требованиям, приведенным в табл. 1. Здесь параметры, относящиеся к образцу, приняты равными единице.

Таблица 1

Отношения параметров модели к параметрам образца при  $C_l = \frac{1}{m}$

Параметры	Образец	Модель	№ условия
Газ			
$\gamma_g$	1	1	1
$C_p$	1	1	2
$\mu$	1	$\frac{1}{m}$	3
$\lambda_g$	1	$\frac{1}{m}$	4
$\epsilon$	1	1	5
$\alpha, \beta, \eta, \zeta,$	1	$m$	6
Обмуровка			
$\gamma_m$	1	1	7
$C_m$	1	1	8
$\lambda_m$	1	—	9
$A_m$	1	1	10
Обмуровка			
$A_{cm}$	1	1	11
	1	1	12

Приведенный методический прием огневого моделирования может быть в принципе распространен и на огневое моделирование газогенератора, Если при этом обеспечить выполнение наиболее трудных условий 3—6, в табл. 1, то, как указывают приведенные выше опыты, показатели модели и образца будут одинаковы.



## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### НЕКОТОРЫЕ УКАЗАНИЯ О РАСЧЕТЕ И КОНСТРУИРОВАНИИ МОДЕЛЕЙ

Основные положения моделирования дают возможность так рассчитать и сконструировать модель, чтобы воспроизвести в ней действительные процессы движения топлива, воздуха, генераторного газа и воды, происходящие в реальных элементах газогенераторной установки.

При создании модели прежде всего необходимо тщательно продумать формулировку главной задачи исследования, методику и технику его проведения. В зависимости от этого должны решаться пути конструирования модели и выбор рабочей среды.

При помощи модели можно производить как качественные, так и количественные наблюдения.

Под качественными наблюдениями понимают изучение общей картины движения (топлива, воды, газа и др.), а под количественными — изучение расходов, давлений и др.

Эти оба вида наблюдений предъявляют к модели ряд требований расчетного и конструктивного характера.

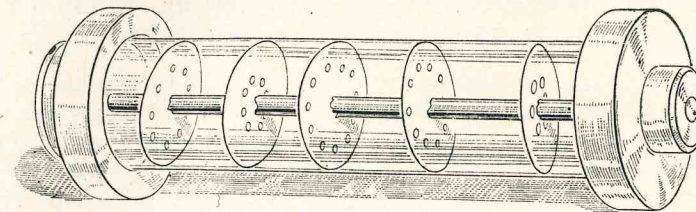
В общем виде расчету подлежат: а) скорости воздуха, газа и воды в элементах образца; б) скорости воздуха, газа и воды в элементах модели; в) масштаб модели.

При выборе рабочей жидкости или газа в модели следует иметь в виду необходимость соблюдения равенства числа Рейнольдса в модели и образце. Только при этом условии можно ожидать сходимости результатов.

Практика лабораторных работ по моделированию позволяет сделать некоторые общие рекомендации. Прежде всего несколько слов о масштабе модели. В ряде случаев (циклоны, охладители) модели могут быть выполнены в масштабе 1:1, однако при исследовании, например, газогенератора или скруббера, модель может быть выполнена и в меньшем масштабе. Наиболее удобны для моделирования размеры рабочей части модели 0,75—1,0 м, при этом следует иметь в виду, будет ли это водяная модель или воздушная. Вообще водяные модели имеют ряд преимуществ перед газовыми и, главным образом, благодаря возможности регулирования скорости движения воды

в элементах модели. Чем меньше скорость, тем более удобно изучать картину движения. Малая кинематическая вязкость воды позволяет устанавливать скорость ее движения в модели, в десять раз меньшую, чем в случае воздушной (газовой) среды. Вода, кроме того, дает возможность применять простые красители, что ставит ее в исключительное положение перед другими индикаторами при качественном изучении картины движения.

Для того, чтобы картина движения была доступна для наблюдения, модели изготавливаются прозрачными (стекло или пластмасса). Для того, чтобы движение жидкости было заметно, ее подкрашивают марганцевоокислым калием, алюминиевыми красками или подмешивают в воду растертые в порошок твердые частицы мела, алю-



Фиг. 3. Общий вид прозрачной модели для исследования сухой очистки генераторного газа.

миния, бронзы и др. Для того, чтобы более наглядно произвести наблюдения в местах больших скоростей или вихревых движений, к ним, при помощи специальных трубочек, подводится дополнительное красящее вещество. Все это, естественно, должно быть учтено при составлении методики наблюдения и конструировании самой модели. Подкрашивание воздуха в воздушных моделях производится табачным дымом, смешением воздуха, насыщенного парами соляной кислоты, с парами подогретого аммиака и др.

Для наблюдения за направлением скоростей иногда в поток вводятся шелковые нити или тонкие бумажные полосы.

Количественные наблюдения обычно содержат замеры скоростей, сопротивлений и т. д. Изучение сопротивлений связано обычно с замами статических давлений, производимых с помощью специальных приборов. Скорость измеряется микротрубками. Установка измерительных приборов должна быть учтена при конструировании модели и осуществлена с таким расчетом, чтобы установка приборов была удобна, отвечала месту замера и не влияла на его точность.

Задачей моделирования процессов в элементах газогенераторной установки является изучение движения газов, топлива и воды во внутренних ее элементах. В связи с этим при конструировании модели нет необходимости соблюдать точное геометрическое подобие образца. Более того, для удобства наблюдения следует упрощать и внутренние элементы модели.

Основой модели является каркас, создавать который следует, учитывая возможность применения при опытах и газа и воды. Все соединения элементов модели, включая прозрачные детали, должны обеспечить максимальную герметичность модели. Невнимательный монтаж и герметизация модели могут привести при исследовании к ложным выводам.

Возможность широкого выбора материалов для изготовления модели упрощает всю организацию работ и предоставляет возможность быстрого изготовления таких моделей, в отдельных случаях даже силами небольших коллективов, проводящих работы по моделированию. На фиг. 3 приведена прозрачная модель элемента для исследования очистки генераторного газа.

#### ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА И ВОДЫ В ЭЛЕМЕНТАХ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

Для более наглядного изучения движения воды и газа в моделях газогенераторной установки употребляются различного вида индикаторы. При работе с водяными моделями, в качестве подкрашивающих веществ применяют анилиновые краски и марганцевоокислый калий. При фотографировании применяются краски черного или коричневого цвета.

К воде можно примешивать алюминиевую пудру, мел, шарики из смеси воска со смолой и др. Для того чтобы обеспечить поступление краски в модель, ее следует подавать под несколько большим давлением. В виду того, что краска быстро размешивается (в особенности на завихренных участках), а уловить движение подкрашенного потока можно только тотчас после примешивания краски, следует устанавливать трубки для ввода краски перед всеми наиболее интересными участками. Трубки имеют диаметр 3—5 мм и устанавливаются через специальные сальники, заранее припаиваемые к стенкам модели. Отверстие трубки должно быть расположено так, чтобы кинетическая энергия струи краски терялась возможно быстрее; для этого трубки приготавливаются с запаянным концом, с несколькими отверстиями по одной образующей. Подача краски под давлением может осуществляться из высоко установленного резервуара или посредством ручного воздушного насоса.

Наблюдаемую картину движения можно сфотографировать или зарисовать. При этом можно осуществлять скоростную с короткой экспозицией единичную фотографию, или, для быстрых процессов, нормальную, или высокоскоростную киносъемку для наблюдения поэтапного процесса [19].

Если модель имеет застекленные противоположные стенки, то фотографирование можно вести на просвет с установкой фотоаппарата и источника света с противоположных сторон.

Стенка модели, служащая при съемке фоном, должна быть окрашена черной матовой краской. В этом случае для красителя потока может быть использована мелкая металлическая пыль, освещенные частички которой дадут на фотографии светлые штрихи на темном фоне.

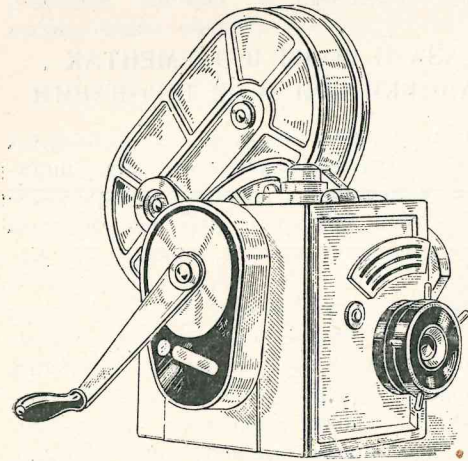
Кинолента является прекрасным документом для дальнейшего изучения и демонстрации.

В настоящее время известны четыре принципиально отличных друг от друга метода кинематографической съемки: съемка на прерывисто движущуюся пленку, съемка по методу оптической компенсации, съемка щелевым аппаратом и съемка с импульсным освещением, наиболее известной разновидностью которой является искровая съемка.

Сущность метода киносъемки на прерывисто движущуюся пленку заключается в том, что экспонирование отдельного кадра и подача

светочувствительного материала происходят не одновременно, а следуют друг за другом.

При работе остальными тремя методами съемка производится на равномерно движущуюся пленку, а экспонирование отдельных кадров и подача светочувствительного материала происходят одновременно. Из этих трех методов наиболее широко используется метод оптической компенсации, при котором объект съемки с помощью движения съемочного объектива перемещается во время экспозиции в том же направлении и с той же скоростью, с какой движется пленка.



Фиг. 4. Камера типа СКС с ручным приводом для скоростной съемки.

Съемка щелевыми аппаратами и съемка с импульсным освещением основаны на принципе „мгновенного экспонирования“ движущегося светочувствительного слоя. При этом отдельные кадры фильма экспонируются настолько кратковременно, что за период экспозиции пленка передвигается лишь на расстояние, не превышающее величину допустимой нерезкости изображения.

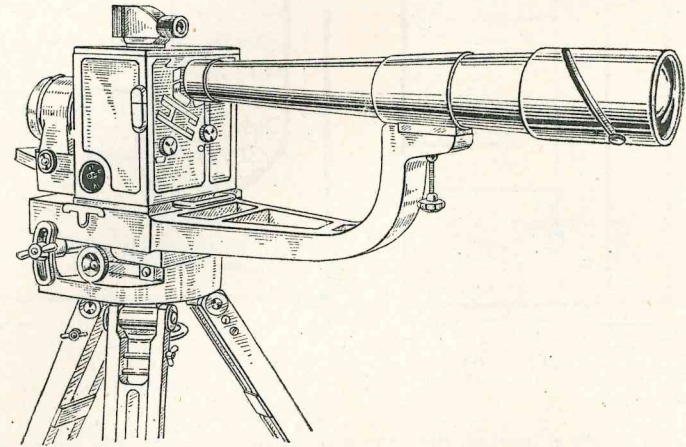
Наиболее известной и распространенной специальной кинокамерой для скоростной съемки на прерывисто движущейся пленке является камера типа СКС. Эта камера разработана Ленинградским институтом киноинженеров и рассчитана на съемку с максимальной частотой 240—250 кадров в секунду. Общий вид этой камеры приведен на фиг. 4.

Для научно-исследовательских целей представляет интерес специальная модель этой камеры, снабженная приспособлением для автоматической регистрации времени в процессе съемки и допускающая регулировку экспозиции путем смены obturатора. При съемке с частотой 240 кадров в секунду это дает возможность устанавливать экспозицию съемки в  $\frac{1}{600}$ ,  $\frac{1}{1000}$  и  $\frac{1}{2000}$ .

Из камер с оптической компенсацией, с применением внутреннего зеркального барабана, следует упомянуть камеру СКС-2 (фиг. 5).

Скорость движения пленки в этом аппарате до 30 м/сек. Кассета вмещает до 60 м нормальной негативной пленки.

Оптическая насадка для дистанционной съемки дает, по сравнению с нормальной съемкой, восьмикратное увеличение и позволяет производить наводку на фокус на расстояния в пределах от 6 м до „бесконечности“.



Фиг. 5. Камера типа СКС-2 с оптической насадкой для дистанционной съемки.

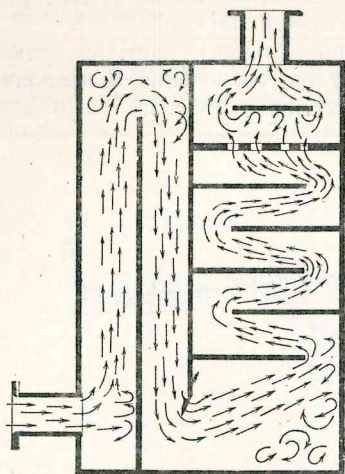
При ручном приводе съемку камерой СКС-2 можно производить любой частотой в пределах 15—100 кадров в секунду. При пользовании моторным приводом частота съемки может быть доведена до 1500 кадров в секунду. Путем уменьшения высоты кадра до 9 мм частота съемки может быть повышена до 3000 кадров в секунду.

Фотография представляет значительные удобства, но в ряде случаев краска, распространяясь по каналам модели довольно интенсивно, закрашивает их и затрудняет наблюдение. В этих случаях, для охвата полной картины движения воды или газа в модели, прибегают к методу зарисовки. На фиг. 6 изображена зарисовка движения газа через элементы сухого очистителя, а на фиг. 7 — движение воздуха из фурмы газогенератора в слой мелкого топлива. В качестве индикатора в воздух вводились пары иода.

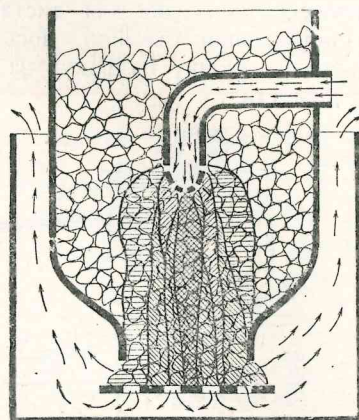
При изучении характера движения газа в воздушных моделях, самым простым методом является примешивание дыма.

Исклчительно наглядным становится движение при примешивании к потоку воздуха тлеющих частиц предварительно разожженной махорки. Подоженные частицы помещают в воронку и присоединяют ее узкий конец к отверстию, сделанному в модели. Всасываясь в модель, горячие частицы воспроизводят движения потока в виде светящихся линий.

Белый туманообразный дым, хорошо выделяющийся на темном фоне, получается при смешении воздуха с насыщенными парами

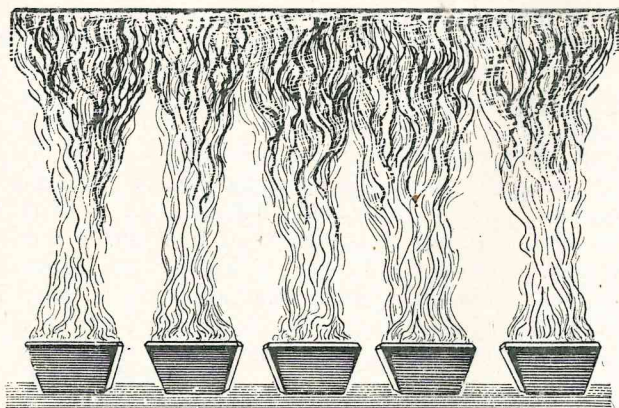


Фиг. 6. Общий вид модели сухой очистки газа с зарисовкой движения газа.



Фиг. 7. Контурная зарисовка движения воздуха из фурмы газогенератора.

соляной кислоты или парами подогретого аммиака. На фиг. 8 приведена фотография движения воздушного потока через колосниковую решетку.

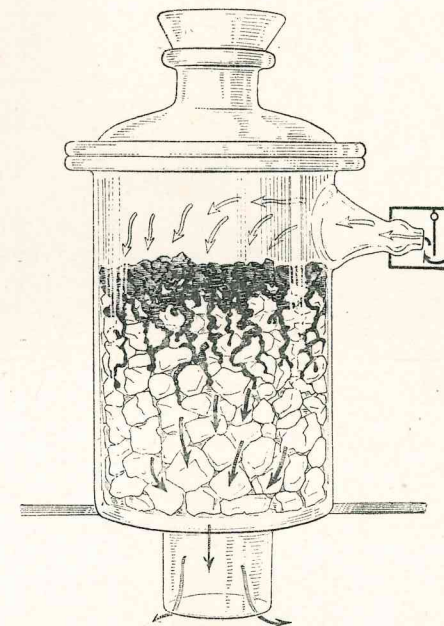


Фиг. 8. Движение воздушного потока через колосниковую решетку.

Измерение скоростей при помощи очень мелких напорных приборов (трубка Пито, шайба Креля, шар Цинена и т. д.) также возможно, но требует большого подготовительного времени.

Порядок работы в этом случае устанавливается следующий. Прежде всего определяется направление потока, а затем уже идет установка приборов, при этом в застойных областях снимается несколько полей скоростей.

Несколько отличен эксперимент при исследовании прохождения газа или воды через слой засыпки в модели газогенератора. В этом случае применяется цветной метод, заключающийся в подкрашивании воды, газа или засыпки. Это бывает особенно необходимо в том случае, если исследуется модель с напластованными слоями, состоящими из топлива различной зернистости. В одном случае окрашивается поток воды, в другом — в поток воздуха, продувающий слой топлива, вводятся пары иода, а кусочки топлива предварительно обрабатываются крахмалом. Иногда вместо паров иода применяют хлор; в этом случае кусочки топлива предварительно обрабатываются иодистым калием.



Фиг. 9. Движение газа через слой топлива различной зернистости в прозрачной воздушной модели газогенератора.

На фиг. 9 приведена прозрачная воздушная модель газогенератора обращенного процесса. Индикатором служат пары иода. Общая картина движения газа через слой засыпки зафиксирована методом скоростной фотографии.

Во всех описанных случаях путь газа в загрузке обнаруживается либо цветным следом подкрашенной воды, либо изменением цвета засыпки в местах химической реакции применяемых в опыте химических элементов. В случае исследования модели с напластованными слоями топлива различной степени зернистости, применяют  $H_2S$ , дающую возможность окрашивать различные зоны в разные цвета. В этом случае кусочки мрамора, имитирующие топливо, предварительно обрабатывают солями кадмия, сурьмы, свинца и др.

При соответствующем освещении можно получить цветные фотографии, а в случае использования высокоскоростной киносъемочной камеры можно заснять на пленку весь процесс прохождения газа или воды через засыпку.

Значительный эффект при изучении движения воздуха и газов в моделях может дать метод трассирующего газа. Этот метод может быть особо полезен в тех случаях, когда требуется определить пол-

ноту прохождения воздуха через определенные засыпки и выявить остаточные объемы. При этом способе в подводящую систему модели вводится трассирующий газ, концентрация которого замеряется довольно просто. Воздух в смеси с трассирующим газом равномерно распределяется в моделируемой системе. В качестве трассирующего газа может употребляться аммиак, окись углерода, метан, монометиламин и диметиламин.

## ГЛАВА ПЯТАЯ

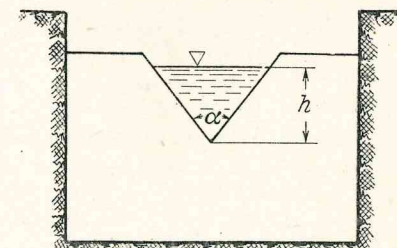
### ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

При работе с моделями исключительно важное значение придается степени точности измерений получаемых количественных данных. Остановимся вкратце на методике измерений, хорошо себя зарекомендовавшей.

#### Определение расхода в водяных моделях

Наиболее простым способом определения расхода воды в водяной модели является ее взвешивание или сбор в мерный бак. Расход воды можно определить при помощи нормальных диафрагм и сопел, устанавливаемых на подводящей водопроводной линии.

Наряду с указанными методами, в практике лабораторных работ применяется метод водослива с постоянным коэффициентом расхода. Практически он выполняется в виде отверстия, имеющего форму равнобедренного треугольника с вершиной, обращенной вниз (фиг. 10). При таком сечении отверстия площади нормальных сечений струй при разных напорах будут представлять подобные треугольники. Расход воды через водослив выразится в следующем виде:



Фиг. 10. Схема водослива.

$$Q = kh^{\frac{5}{2}} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (61)$$

где высота напора  $h$  берется в метрах, а коэффициент  $k$ , на основании опытов для угла  $\alpha = 90^\circ$ , равен 1,4.

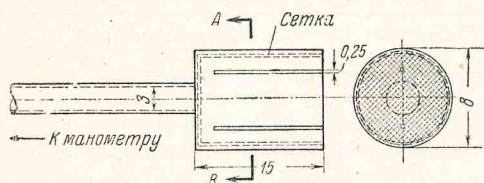
Для того чтобы устранить влияние волн на истечение, водослив устанавливается в водосборном канале на достаточном расстоянии от места слива воды из модели. Измерение высоты напора производится крючком с микрометрическим винтом в особом колодце, соединенном трубкой с водосборным каналом.

## Измерение давлений в водяных моделях

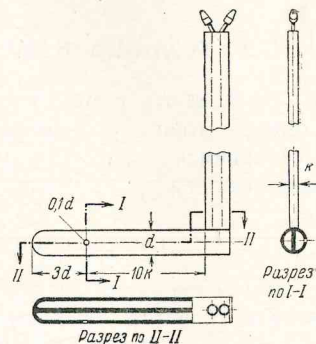
При измерении давлений на моделях следует с особой внимательностью отнестись, прежде всего, к отбору давлений, подразумевая под этим выбор, подготовку места и установку прибора для измерения давлений. Отверстие и отводящий штуцер должны быть строго перпендикулярны по отношению к стенке и не должны иметь заусенцев. Диаметр отверстия рекомендуется брать в пределах 0,5 — 1,2 мм.

В моделях, каналы которых заполнены поверхностями нагрева, отбор статического давления через отверстие в стенке не применим; в этом случае применяются специальные трубки.

Например, приведенная на фиг. 11 трубка типа Нифера отбирает давление независимо от условий ее положения по отношению к направлению потока. В этой



Фиг. 11. Схема трубки типа Нифера для отбора давлений.



Фиг. 12. Схема трубки Ильина.

трубке внутреннее пространство заполнено тампоном из мелкой сетки или дробью, которые гасят динамический напор потока в месте отбора.

По образующей цилиндра делается 6—8 прорезей шириною 0,2—0,3 мм. Острые края прорезей обычно шлифуются. Новые трубки перед замером необходимо проверить в канале с заранее известными направлениями движения потока, сопоставляя с показаниями давления, отобранного уже проверенным прибором. Из описанных специальных трубок применяется трубка Ильина с двумя отверстиями для отбора давлений, расположенными на одной прямой (фиг. 12). Трубка внутри разделена на две полости, и давление от каждого отверстия подводится к манометру. Это устройство позволяет поставить трубку точно по направлению потока. Присоединив трубку к дифференциальному манометру, необходимо ее вращать до тех пор, пока показания манометров не совпадут.

Отобранные тем или иным способом давления измеряются водяными манометрами с миллиметровой шкалой, которые, в случае замера во многих точках, объединяются группами на манометрическом щите.

Для увеличения точности отсчета при малых перепадах, в верхнюю часть перевернутого  $v$ -образного манометра помещают жидкость

легче воды (керосин, амилацетат), благодаря чему разность уровней в приборе получаем увеличенной. Например, применяя керосин с удельным весом 0,8 и воду с удельным весом 1, имеем разницу в удельных весах 0,2, т. е. пятикратное увеличение чувствительности манометра.

## Измерение скоростей в воздушных моделях

При работах с воздушными моделями измерение скоростей чаще всего производят трубкой Прандтля с диаметром от 3 до 6 мм. Места для такого измерения скоростей следует выбирать в таких точках, где можно ожидать плавного изменения скорости по сечению. Если по условиям измерения нельзя выбрать прямолинейный участок и приходится вести измерение немого отступив от поворота, необходимо применять искусственные успокоители потока (направляющие лопатки) [20]. Возможность вращения потока устраняется установкой пластинчатых выпрямителей.

Для ориентировки при выборе диаметра измерительной трубки пользуются графиком Никурадзе (фиг. 13). На этом графике по оси абсцисс отложено отношение диаметра трубки к диаметру канала, а по оси ординат — ошибка, появляющаяся при измерении вследствие ввода трубки в канал. Задаваясь, например, ошибкой в 2%, получаем, что в трубе диаметром в 200 мм следует применять трубку с внешним диаметром не более 4,6 мм.

При моделировании чаще всего приходится иметь дело с круглыми трубами. Для вычисления среднего показания необходимо все измерения скорости производить по двум взаимно перпендикулярным диаметрам, усредняя полученные значения для сходственных точек диаметров.

Зная среднюю скорость воздуха  $w_{ср}$  и площадь трубы  $F$ , можно получить секундный расход воздуха:

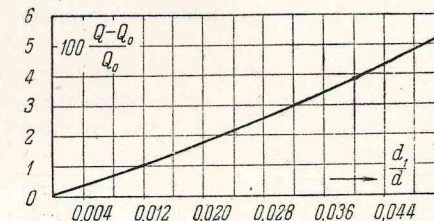
$$v = w_{ср} F, \quad (62)$$

где

$$w_{ср} = \frac{1}{F} \int_F w dF.$$

Имея  $F$  для круглой трубы  $= \pi r^2$ , получим

$$w_{ср} = \frac{1}{\pi r^2} \int_F w d(r^2), \quad (63)$$



Фиг. 13. Влияние диаметра трубки Прандтля на точность измерения расхода.

или

$$\omega_{\text{ср.}} = \frac{1}{0,5r^2} \int_F (\omega r) dr. \quad (64)$$

Для практического использования удобнее всего среднюю скорость находить графическим путем. Используя формулу (63), следует построить график зависимости  $\omega = f(r^2)$ , по которой средняя скорость определится как средняя ордината.

В случае использования формулы (64) за координаты принимаются  $\omega_2$  и  $r$ . Кривая, в этом случае, ограничивающая площадь, даст

$$\int_F \omega dr.$$

Определив эту площадь и разделив ее на  $0,5 r^2$ , найдем среднюю скорость  $\omega_{\text{ср.}}$ .

Если нам необходимо получить средние скорости для ряда режимов, то следует, при предварительных опытах, установить для нескольких режимов зависимости средней скорости  $\omega_{\text{ср.}}$  от скорости  $\omega_{\text{в}}$  в произвольной точке и построить график  $\omega_{\text{ср.}} = f(\omega)$ .

В этом случае достаточно только определить скорость в выбранной точке, а среднюю скорость принять по графику. В случае необходимости быстрого замера скоростей, хотя и с менее точными результатами, применяют диафрагмы и сопла.

При исследовании скоростей воздуха в элементах газогенераторной установки иногда установление объемного расхода воздуха представляет меньший интерес, чем исследование скоростного поля, в результате которого возможно построить векторную диаграмму скоростей в поле воздушных фурм. В этом случае на трубки Прандтля свободно надевается лимб с градусными делениями, снабженный отвесом, позволяющим линию  $0^\circ$  установить строго вертикально.

Стрелка, припаянная к стержню трубки, параллельно ее носику, дает отклонение направления носика трубки от оси канала. Введя трубку в модель, в установленном месте, начинают ее вращать до тех пор, пока отбираемое ею давление не станет максимальным. Проверив установку лимба, отсчитывают динамический напор и отмечают отклонение стрелки в градусах.

При работе с воздухом статические давления отбираются так же, как в водяных моделях. Для измерения имеющихся чаще всего небольших давлений применяют микроманометры с уклоном от  $1/4$  до  $1/400$  или манометры типа „Аскания“, дающие точность отсчета в  $0,01 \text{ мм Н}_2\text{О}$  при максимально возможном отсчете давления до  $120 \text{ мм}$ .

### Измерение температур

При моделировании теплоотдачи измеряемая температура практически не превышает  $100—150^\circ \text{С}$ . Измерение таких температур можно производить в масляной или водяной ванне ртутными термо-

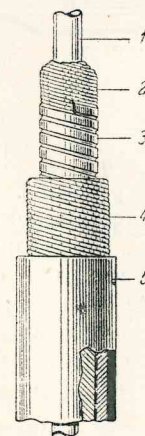
метрами и железо-константовыми термопарами с градуировкой. Спай градуируемых термопар при этом прикрепляются возможно ближе к шарiku ртутного эталонного термометра. При изменении малых температур, для повышения точности отсчета, применяют гипертермопары, представляющие собою несколько последовательно соединенных термопар.

В случае одновременного замера температур термопарами в нескольких местах, эти термопары для удобства и быстроты переключения присоединяются к промежуточному переключателю.

### Измерение количества тепла

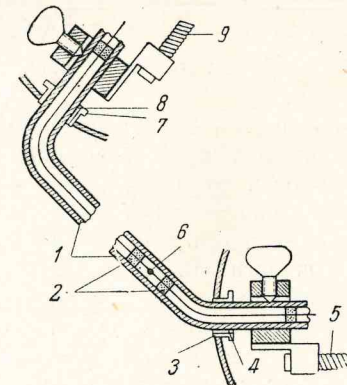
Измерение количества тепла при моделировании теплоотдачи измеряется в трубках-калориметрах. Применяются электрический, водяной и паровой калориметры.

Электрический калориметр может нагреваться двумя способами.



Фиг. 14. Схема электрического калориметра:

1 — металлический стержень; 2 — асбестовый шнур; 3 — электрическая спираль; 4 — электроизоляционный слой; 5 — трубка-калориметр.



Фиг. 15. Схема трубки — электронагревателя:

1 — трубка-калориметр; 2 — асбестовые пробки; 3 — изолирующая втулка; 4 — вольтовый отвод; 5 — отвод тока; 6 — спай термопары; 7 — изолирующая втулка; 8 — вольтовый отвод; 9 — провод тока.

При первом (фиг. 14) способе электрический нагреватель помещается внутри трубки калориметра. Калориметр этого типа удобно изготовлять при наружном диаметре экспериментальной трубки не менее  $8—10 \text{ мм}$ . Так как в большинстве моделей диаметр трубки менее  $8 \text{ мм}$ , то в качестве нагревателя используют трубку-калориметр, к которой подводится ток (фиг. 15). Температура стенки

трубки здесь измеряется термопарой, вводимой внутрь трубки. Горячий ее спай может перемещаться в любом направлении по оси трубки, благодаря чему температуру можно определять в любом участке трубки и вычислять коэффициент теплопередачи  $\alpha_c$  для всех ее участков, считая тепловыделение пропорциональным длине трубки. Пользуясь законом Джоуля-Ленца, подсчитывается тепло, выделенное электронагревателем:

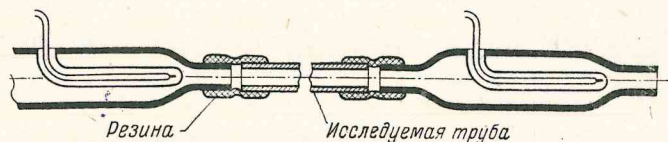
$$Q = 0,86IE \text{ ккал/час}, \quad (65)$$

где 0,86 — тепловой эквивалент одного  $\text{вт/часа}$  в  $\text{ккал/вт/час}$ ;

$I$  — сила тока в цепи в  $\text{а}$ ;

$E$  — падение напряжения в пределах электронагревателя в  $\text{в}$ .

Нагрев трубок-калориметров можно производить пропуская через них горячей воды, не прибегая к точным измерениям в электрической цепи.



Фиг. 16. Схема водяного калориметра.

Схема водяного калориметра приведена на фиг. 16. Здесь в стеклянные колбы заложены дифференциальные термопары. Из-за большой теплоемкости воды разность замеренной термопарами температуры воды обычно не превышает  $0,4 - 1,0^\circ \text{C}$ , в силу чего эту разность следует замерять компенсационным методом для обеспечения требуемой точности отсчета. В случае обогрева калориметра насыщенным водяным паром постоянного точно известного давления, с одной и той же температурой пара на входе и конденсата на выходе, расход тепла определяется взвешиванием конденсата и умножением его веса на теплоту парообразования.

### Метод меченых атомов

Исключительно широкие перспективы в практике исследования движения воды и газа в моделях, а также в их измерении открывает метод исследования при помощи радиоактивных индикаторов, называемых чаще методом меченых атомов [21]. Основой метода меченых атомов является использование веществ, имеющих одинаковые химические свойства, но различающихся своими физическими свойствами. Эти вещества носят название изотопов.

Так, у изотопов оказывается различен атомный вес, а следовательно, и скорость движения атомов и их ионов, а также скорость диффузии. Таким образом, различие физических свойств изотопов является по существу их меткой, по которой изотопы можно отличить друг от друга.

В настоящее время известно большое количество изотопов, значительная часть которых получена искусственно.

Ценность метода меченых атомов заключается не только в его исключительно высокой чувствительности, но главным образом в том, что этот метод открывает принципиально новые возможности исследования.

Современная техника располагает двумя методами ядерной индикации: методом стабильных изотопов и методом радиоактивных изотопов.

Стабильные изотопы в природе находятся в смеси с другими изотопами данного элемента и выделяются из этих элементов различными процессами (диффузия, электролиз, дистилляция и др.), Устойчивые нерадиоактивные меченые атомы отличаются от других видов того же элемента своим атомным весом и могут быть более тяжелыми и более легкими. В настоящее время известно около 225 стабильных изотопов [23].

Получение меченых атомов с помощью стабильных изотопов представляет довольно сложную задачу, особенно для тяжелых элементов.

По сравнению со стабильными изотопами выделение радиоактивных изотопов имеет то преимущество, что в большинстве случаев оно может производиться обычными химическими методами, так как получаемый продукт по своим химическим свойствам немного отличается от материала, из которого он был получен.

Чувствительность метода радиоактивных изотопов оказывается неизмеримо более высокой, чем при использовании стабильных изотопов, и требует применения весьма малых количеств радиоактивного вещества (так как счетчик Гейгера-Мюллера регистрирует только распады отдельных атомов радиоактивного вещества). В случае стабильных изотопов концентрация индикатора может приближаться к  $100\%$ , в силу требований и чувствительности измерительного прибора — масс-спектрометра, измеряющего интенсивность ионного пучка.

Поскольку получение большинства радиоактивных изотопов более удобно и дешево, чем разделение стабильных, а измерение их производится более простыми и в тысячу раз более чувствительными методами — в технике меченых атомов стабильные изотопы почти полностью вытеснены радиоактивными, период полураспада большинства которых обеспечивает длительное хранение и экспериментирование.

Основными моментами при постановке исследований с мечеными атомами являются: выбор типа частиц, их энергии и периода полураспада радиоактивного изотопа.

Радиоактивный распад сопровождается выбрасыванием частиц неустойчивых ядер, содержащих избыток протонов или электронов. В результате распада возникает либо стойкое ядро, либо ядро, в свою очередь выбрасывающее частицы и претерпевающее распад. Схема распада, определяющая типы частиц и их энергию, характерна для каждого отдельного изотопа.



Большинство изотопов, представляющих интерес для исследователя, распадаются, испуская либо только  $\beta$ -лучи (отрицательные и положительные электроны, обладающие большой энергией), либо  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи (фотоны с большой энергией).

Процесс распада всех радиоактивных изотопов протекает экспоненциально, при этом общее число ядер, распадающихся в единицу времени, зависит от общего числа имеющихся радиоактивных атомов.

Если через известные промежутки времени в одних и тех же условиях измерять активность пробы, содержащей изотопы, и выразить графически зависимость радиоактивности, откладываемой в логарифмической шкале, от времени, откладываемого в полулогарифмической шкале, то получится прямая линия. Наклон этой линии дает нам константу распада, которая показывает долю атомов, претерпевающих превращение за единицу времени.

Для выражения скорости распада пользуются термином „период полураспада“, в течение которого количество атомов данного изотопа уменьшается вдвое. При работе с изотопами, имеющими малый период полураспада, скорость их распада ограничивает время опыта. В случае работы с изотопами с малой удельной активностью, в редких случаях можно допускать, чтобы весь период работы превышал пять периодов полураспада. За это время активность, падая до  $1/32$  к исходной, делает опыт неточным.

Трудности, возникающие при работе с изотопами, обладающими длительными периодами полураспада, связаны не столько с планированием исследования, сколько с охраной здоровья исследователей, что должно быть тщательно учтено при организации таких работ [22].

Радиоактивные элементы находят в настоящее время все более широкое применение в различных областях науки и техники. Метод меченых атомов позволяет вести исследования химических реакций, строения молекул, механизма каталитических процессов, растворимости малорастворимых веществ, износа материалов, обмена веществ в живых организмах и т. д. [22].

Метод использования газов в качестве источников изотопного анализа (радиоактивные изотопы водорода, углерода, серы) и освоившая практика приготовления образцов этих газов [21] значительно расширяют использование метода меченых атомов в моделировании вообще и, в частности, элементов газогенераторной установки.

В данном случае метод меченых атомов дает возможность:

а) исследовать поток в непрозрачных моделях и повысить точность результатов;

б) исследовать поток горячих газов на моделях в образце не только в части определения его скорости и расходных показателей, но и провести наблюдение за изменением качества (состава) газа по отдельным зонам газогенератора, путем примешивания к воздушно-газовому потоку меченых атомов таких газов, как кислород, азот, водород, углекислота.

В связи с указанным приводим в табл. 2 характеристику некоторых радиоактивных изотопов.

В графе 1 табл. 2 указан атомный номер изотопа ( $z$ ), обозначающий номер места элемента в периодической системе элементов Менделеева; в графе 2 помещено название элемента и в графе 3 — его символ.

В графах с 5 по 8 приведены характеристики изотопов — устойчивых и радиоактивных. В графах 5 и 7 даны массовые числа ( $A$ ) изотопов, показывающие число протонов и нейтронов, находящихся в ядре. Массовое число приблизительно равно массе атома в атомных единицах. Число протонов в ядре равно порядковому номеру элемента в периодической системе.

В графе 8 приведен период полураспада изотопа, показывающий продолжительность существования радиоактивного элемента. Иначе, период полураспада — это время, в течение которого наличное количество атомов уменьшается вдвое.

В графах с 9 по 12 приведена величина энергии излучений. Эта энергия измеряется в  $MeV$  (мега — электрон — вольт) и равна энергии, которую приобретает частица в поле напряжением в 1 000 000 в.

Измерение радиоактивных изотопов основывается на радиации, сопровождающей распад радиоактивных изотопов, при которой происходит образование новых атомов и одновременно излучение  $\alpha$ -частиц (потоки ионов),  $\beta$ -частиц (быстрые электроны), а иногда жестких  $\gamma$ -лучей (электромагнитные измерения).

Каждая из частиц характеризуется определенной длиной пробега и числом ионизаций на единицу длины этого пробега.

Для широкого круга измерений наибольший интерес представляют  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -лучи.  $\beta$ -частицы представляют собой положительные ( $\beta+$ ) или отрицательные ( $\beta-$ ) электроны ядерного происхождения. Масса их составляет около  $1/1000$  водородного ядра или протона, а скорость очень велика, приближаясь к скорости света.

В связи с тем, что масса  $\beta$ -частиц мала, а скорость велика, длина их пробега в воздухе измеряется сотнями сантиметров, а их удельная ионизация значительно меньше удельной ионизации  $\alpha$ -частиц.

$\gamma$ -лучи представляют фотоны с высокой энергией. Они перемещаются со скоростью света и характеризуются гораздо более длинными пробегами в воздухе и в твердом веществе, чем пробеги  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц. Однако их удельная ионизирующая способность соответственно ниже.  $\gamma$ -лучи отдают свою энергию электронам, которые, в свою очередь, вызывают вторичную ионизацию, при чем количество потерянной  $\gamma$ -лучами энергии и число вызванных вторичных ионизаций тесно связаны с плотностью поглощающего вещества.

Действие всех приборов для измерения радиоактивности основано на использовании вторичных эффектов радиации.

Для указанных измерений применяется действие излучений на фотографическую эмульсию или различные ионизационные приборы. Эффективность всех этих методов зависит от их чувствительности и от силы измеряемого источника.

## Характеристики

Атомный номер (Z)	Название элемента	Символ	Атомный вес	Устойчивые изотопы	
				Массовое число (A)	Распространенность в %
1	Водород	H	1,008	1 2	99,98 0,02
6	Углерод	C	12,01	12 13	98,9 1,1
11	Натрий	Na	22,997	23	100
15	Фосфор	P	30,974	31	100
16	Сера	S	32,06	32 33 34 36	95,1 0,74 4,2 0,016
19	Калий	K	39,096	39 (40) 41	93,44 0,011 6,54
19	Кальций	Ca	40,08	40 42 43 44 46 48	96,96 0,64 0,15 2,07 0,003 0,185
26	Железо	Fe	55,85	54 56 57 58	5,84 91,68 2,17 0,31

## некоторых изотопов [23]

Массовое число (A)	Период полураспада	Энергия различных излучений MeV				K — захват (K) или внутренняя конверсия электронов (I)
		$\beta^-$ (электронное излучение)	$\beta^+$ (позитронное излучение)	$\gamma$ — излучение		
3	12,1 года	0,015	—	—	—	
10 11 14	8,8 сек. 20,5 сек. $5 \times 10^8$ лет.	0,145	3,4 0,95			
21 22 24 25	23 сек. 3 года 14,8 часа 6 сек.	1,40 2,8	+? 0,6	1,3 1,5, 3,22 0,035		
29 30 32 34	4,6 сек. 2,55 мин. 14,5 дня 12,4 дня	1,7 3,2, 5,1	3,63 3,0	1,9		
31 35 37 —	3,2 сек. 87 дней 5 мин. —	0,17 1,6, 4,3 —	4,85 — —	2,7		
38 40 42 43	7,7 мин. $\sim 4 \times 10^8$ лет 12,4 часа 22,4 часа	0,4, 1,3 3,5 0,24, 0,81	2,3	2,15 2,0 1,5 0,4	K	
39 39 45 49 49	4,5 мин. 1,06 сек. 180 дней 2,5 часа 30 мин.	0,19, 0,91 2,3 +	+	0,8		
52 53 55 59	7,8 часа 8,9 мин. $\sim 4$ года 44 дня	0,26, 0,46	0,55 +	1,1, 1,3	K	

Атомный номер (Z)	Название элемента	Символ	Атомный вес	Устойчивые изотопы	
				Массовое число (A)	Распространенность в %
27	Кобальт	Co	58,94	59	100
29	Медь	Cu	63,57	63 65	68 32
30	Цинк	Zn	65,38	64 66 67 68 70	50,9 27,3 39 17,4 0,5
33	Мышьяк	As	74,91	75	100
35	Бром	Br	79,916	79 81	50,6 49,4

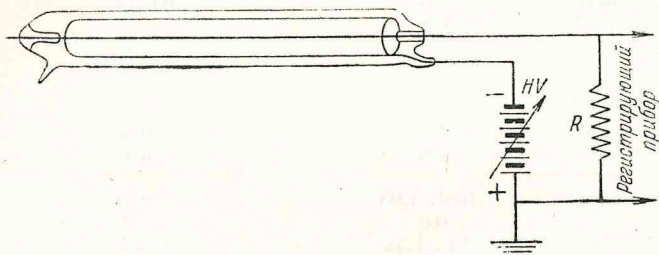
Массовое число (A)	Период полураспада	Энергия различных излучений MeV				K — захват (K) или внутренняя конверсия электронов (I)
		$\beta^-$ (электронное излучение)	$\beta^+$ (позитронное излучение)	$\gamma$ — излучение		
55 56 57 58 60 60	18,2 часа 72 дня 270 дней 72 дня 5,3 года 10,7 мин.		1,5 1,5 0,26 0,4	0,16, 1,2 0,85, 3,3 0,12, 0,215 0,8 1,1, 1,3 0,06, 1,5	K K	
59 60 61 62 64 66	81 сек. 24,6 мин. 3,4 час. 10,5 мин. 12,8 час. 5 мин.		+ 1, 8, 33 0,9, 1,23 2,6 0,66 —	1,5 0,56 1,2 1,32	K K	
63 65 — — 69 69 72	38 мин. — 250 дней — 57 мин. 13,8 часа 48 час.	— — — 1,0 0,3, 1,6	0,46, 2,32 — 0,4	0,96, 1,9 — 0,45, 1,14	K	
71 72 73 73 74 76 77 78	~88 час. 26 " 50 " 90 дней 16 " 26,8 час. 40 час. 80 мин.	— — — 1,3 61, 3,15 0,8 1,4	+? 0,6 0,9	2,4 0,05 0,58 0,55, 3,2 0,27	K K K	
78 — 80 80 82 83 84 85 87	6,4 мин. — 18,0 час. 4,4 " 34 " 140 мин. 30 " 3 " 50 сек.	— — 2,0 — 0,5 1,3 4,5 2,5 0,25	2,3	0,046 0,108 0,5 0,037, 0,49 0,54, 1,4 +	I	

Атомный номер (Z)	Название элемента	Символ	Атомный вес	Устойчивые изотопы	
				Массовое число (A)	Распространенность в %
47	Серебро	Ag	107,88	107	52,5
				109	47,5
53	Иод	I	126,92	127	100
56	Барий	Ba	137,36	130	0,10
				132	0,09
				134	2,42
				135	6,59
				136	7,81
				137	11,32
				138	71,66
74	Вольфрам	W	183,92	180	0,2
				182	22,6
				183	17,3
				184	30,1
				186	29,8
79	Золото	Au	197,2	197	100

Массовое число (A)	Период полураспада	Энергия различных излучений MeV				K — захват (K) или внутренняя конверсия электронов (I)
		$\beta^-$ (электронное излучение)	$\beta^+$ (позитронное излучение)	$\gamma$ — излучение		
102	73 мин.					
104	16,3 мин.					
105	45 дней					
106	24,5 дней					
106	8,2 дня					
107	40 сек.					
108	2,3 мин.	2,8				
110	22 сек.	2,8				
110	225 дней	0,6				
111	7,5 дня	0,8				
112	3,2 час.	2,2				
124	4,0 дня					
126	13,0 дня	1,1				
128	25 мин.	1,85				
129	108 лет	+				
130	12,6 часа	0,61, 1,03				
131	8,0 дней	0,6				
132	2,4 часа	1,0, 1,35				
133	22 часа	1,3				
135	6,6 часа	1,5				
136	1,8 мин.					
131	12 дней	—				
133	38,8 часа	—				
133	>20 лет	—				
139	86 мин.	2,3				
140	12,8 дня	0,4, 1,2				
—	—	—				
—	—	—				
181	140 дней	—				
185	77 "	0,6				
187	24,1 часа	1,4, 0,6				
194	39,5 часа	—				
195	195 дней	—				
196	13 час.	+				
196	5 дней	0,36				
198	2,7 дня	0,8				
199	3,3 "	1,01				
200	48 мин.	2,5				

В случае организации статических исследований, ставящих перед собою, например, задачу изучения распределения радиоактивных материалов (распределение мелочи на участке топливного слоя, шлаковых включений на участке колосниковой решетки, отложение смолы в закрытых участках системы), применим метод радиоавтографии, заключающийся в непосредственном действии исследуемого участка на фотографическую пластинку. Однако для получения достоверных результатов необходимо пользоваться сравнительно высокими активностями.

Одним из самых мощных средств наблюдения и измерения радиоактивных изотопов является счетчик Гейгера-Мюллера, применяемый для регистрации  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -излучений. В основу работы счетчика положена способность  $\beta$ -частиц интенсивно ионизировать воз-



Фиг. 17. Схема счетчика Гейгера-Мюллера.

дух при прохождении через него. Эта ионизация может быть обнаружена, если заставить  $\beta$ -частицы проходить сквозь электрическое поле, создаваемое конденсатором.

Составными элементами счетчика являются: трубка, гасящая схема, пересчетная схема, механический регистратор и блок питания высокого напряжения.

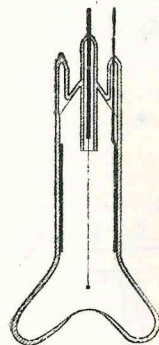
Схема счетчика приведена на фиг. 17.

Счетчик состоит обычно из цилиндрической стеклянной оболочки, покрытой внутри тонким слоем металла и проволоки, расположенной коаксиально с внешним цилиндром и изолированной от него. Трубка счетчика герметична и наполнена газом или смесью газов при низком давлении. Попадая в счетчик, частица производит ионизацию и образует несколько пар электронов и положительно заряженных ионов. Под влиянием приложенного электрического поля электроны двигаются по направлению к проволоке со скоростью много большей, чем скорость положительных ионов,двигающихся к металлическим стенкам.

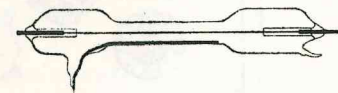
Ускоренные полем электроны в своем движении к нити сталкиваются с большим числом других частиц, благодаря чему происходит дальнейшая ионизация. Создается лавина электронов, образующих импульс разряда, который передается на другие элементы схемы. Чувствительным элементом счетчика является диод, или двухэлектродная трубка, заполненная разряженным газом. Анодом в трубке служит

вольфрамовая нить диаметром около 1,3 мм, а роль катода играет медный цилиндр, находящийся в стеклянном цилиндре. В зависимости от условий работы со счетчиком, объекта исследования и вида частиц, счетные трубки имеют различные конструкции.

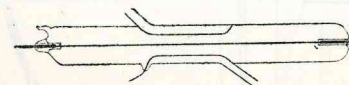
На фиг. 18 приведена схема трубки для улавливания Н-частиц и дейтронов с тонким окошком и проводящим слоем; на фиг. 19 приведена схема трубки с тонкой стеклянной стенкой, у внутренней стороны которой расположен тонкий проводящий слой графита или серебра, служащий катодом. Для измерения излучений жидких веществ и растворов созданы счетчики имерсионного типа. Текущие жидкости можно пропускать через специальную камеру, смонтированную вокруг катода трубки (фиг. 20).



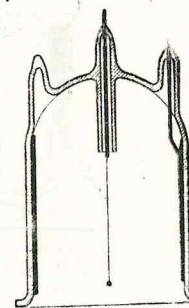
Фиг. 18. Схема трубки с тонким окошком и проводящим слоем.



Фиг. 19. Схема трубки с тонкой стеклянной стенкой.



Фиг. 20. Схема трубки для измерения излучения жидкости.



Фиг. 21. Схема трубки торцевого типа.

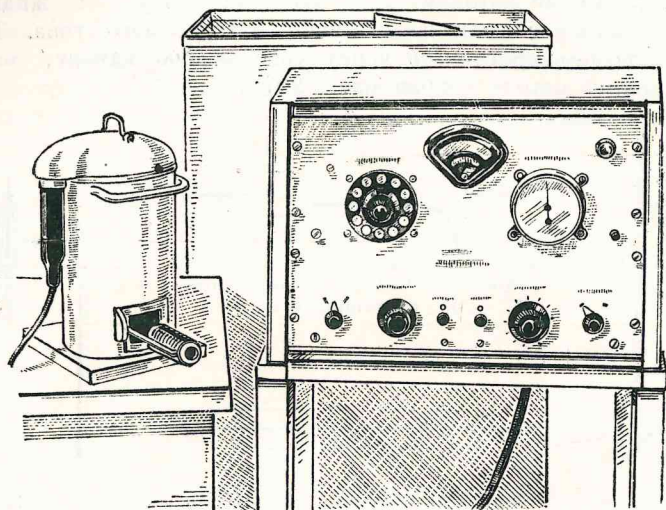
Наиболее употребительным типом лабораторной трубки для исследовательских работ является трубка с торцевым окошком (фиг. 21). Очень тонкий слой слюды, вмазанный или впаянный в колпачковидную стеклянную оболочку, может служить окошком, имеющим большую площадь, выдерживающим достаточное давление и обладающим слабым поглощением.

В связи с тем, что скорость положительно заряженных частиц очень мала, положительный заряд остается вокруг проволоки трубки; кроме того, при столкновении с металлической оболочкой счетчика, положительно заряженные ионы создают фотоны. Для того чтобы закончился один импульс и начался другой, необходимо, чтобы положительные ионы дошли до стенки. Это время, равное  $10^3 - 10^4$  сек., обычно называется „мертвым временем“ счетчика; так, в течение этого времени не может быть зарегистрирована никакая другая частица. Для того чтобы довести счетчик в короткое время до нормального состояния, нужно его „погасить“.

Существуют два метода гашения счетчика. Первый осуществляется при помощи добавления многоатомного газа к смеси, заполняющей

счетчик, а второй — с помощью включения в общую цепь специального гасящего звена.

В процессе работы требуется вообще считать тысячи импульсов. В связи с тем, что механические счетчики не могут работать с такой скоростью, между счетчиком и регистратором устанавливается пересчетное устройство, которое передает один импульс на регистратор после того, как получит от счетчика Гейгера определенное число импульсов.



Фиг. 22. Общий вид счетной установки лабораторного типа.

Общий вид всей счетной установки лабораторного типа приведен на фиг. 22. Здесь, кроме указанных выше отдельных приборов счетчика, имеется свинцовый домик для уменьшения радиоактивного фона трубки и другие специальные приспособления.

Весьма существенным при работе с мечеными атомами является разведение индикатора, при котором возможно обнаружение и измерение с заданной степенью точности. Возможное разведение определяется двумя факторами: метящей способностью и чувствительностью измерительного прибора. Под метящей способностью понимается избыток концентрации над его нормальным содержанием.

Активность радиоактивных препаратов выражается обычно в долях кюри.

Милликюри ( $mc$ ) =  $3,7 \cdot 10^7$  распадов/сек.

Микрокюри  $\mu c$  =  $3,7 \cdot 10^4$  распадов/сек.

Различают три вида лаборатории радиоактивных методов: индикаторную с уровнем интенсивности излучений в счетной комнате для  $\gamma$ -излучений менее  $5 \mu c$  и  $\beta$ -излучений менее  $0,1 \mu c$ ; промежуточную для обычных экспериментальных лабораторий для  $\gamma$ -излучений от  $1 - 500 mc$  и для  $\beta$ -излучений от  $1 - 5000 mc$  и иссле-

довательскую, где уровни излучений еще более высокие. Во всех случаях работы с радиоактивными индикаторами требуется соблюдение особых правил, в целях безопасности [22].

Как уже указывалось выше, точность работы с мечеными атомами исключительно высока, однако результаты измерения нуждаются во введении систематических поправок и приведения результатов измерения со счетчиком к стандарту.

Правильно работающая электрическая схема со счетчиком Гейгера-Мюллера должна давать определенную зависимость скорости счета от напряжения на трубке. При этом наиболее важной частью характеристики является так называемое „плато“ или та часть характеристики, в области которой счетчик регистрирует 100% попадающих в него частиц.

В результате измерений вносятся поправки, которые сводятся к следующему: а) поправка на разрешающую способность, б) поправка на фон, в) поправка на измерение эффективности работы счетчика со временем, г) абсорбция излучения и геометрическое расположение.

Для характеристики точности измерений часто пользуются „вероятной ошибкой“. Математически эта ошибка равна  $0,6745$  (приближенно  $2/3$ ) корня квадратного из числа наблюдений.

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАСЫПКИ В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

Основные условия, обеспечивающие нормальную работу газогенераторных установок, в общем, достаточно хорошо известны.

Вкратце эти условия определяются химико-физическими свойствами топлива, режимом дутья, режимом питания газогенератора топливом для поддержания надлежащей высоты слоя и его температурой. Все эти условия в какой-то мере могут быть численно определены, однако есть одно требование, которое не поддается численному определению, и неизвестно, насколько оно практически выполняется.

Существо этого последнего условия определяется требованиями к физическому состоянию топливного слоя, к его однородности, что обеспечивает одинаковую проницаемость слоя по всему поперечному сечению шахты газогенератора, а следовательно, и равномерный процесс выгазовывания.

Получить равномерную проницаемость топливного слоя при топливе с большим отношением размеров его отдельных кусков теоретически возможно, однако практически невыполнимо. Опасными, в смысле образования прогаров, являются периферийные участки слоя топлива в газогенераторе, особенно если, при центральной загрузке, топливо обладает малой способностью „катания“. Ослабление „крыши“ периферийных участков приводит к образованию „горячих гнезд“ местных очагов с повышенной температурой, очагов шлакования и др. Все это приводит к резкому изменению картины фильтрации слоя и нарушает процесс газификации.

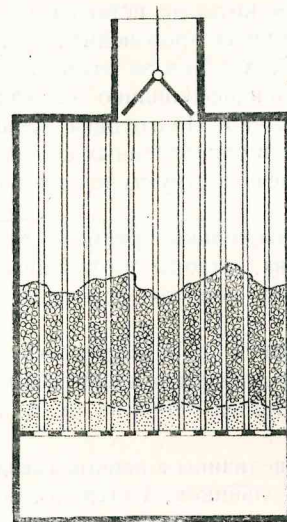
Совершенно ясно, что распределение слоя по сечению газогенератора, создание системы отражателей и геометрия стенок шахты не могут быть успешно решены численным расчетным путем.

Здесь оказывается наиболее приемлемым метод моделирования.

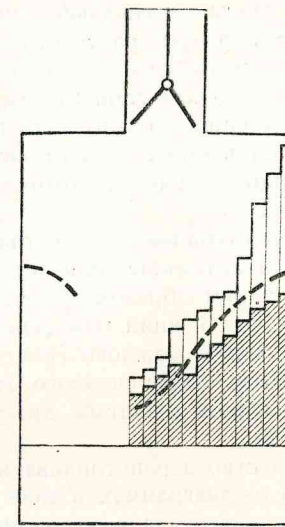
#### Метод слоевой модели

Для изучения вопроса распределения „зерен“ топлива в шахте газогенератора может быть использован метод „слоевой модели“. На фиг. 23 приведена схема такой модели.

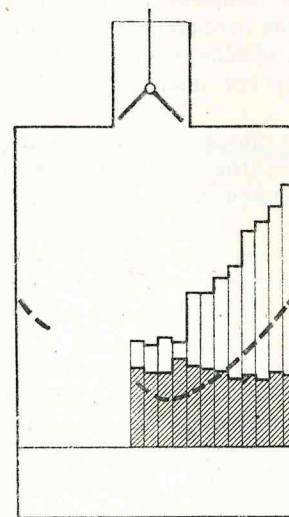
Передняя стенка модели прозрачная и позволяет наблюдать за слоем топлива и фотографировать его положение для каждого момента



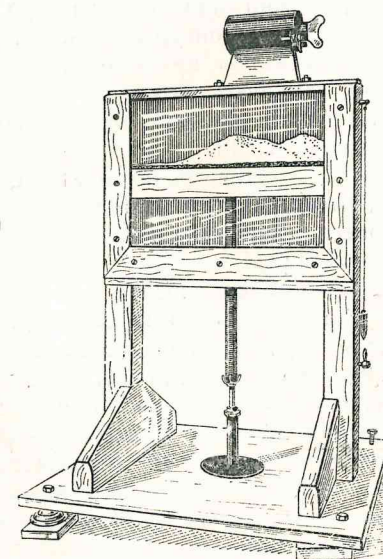
Фиг. 23. Схема статической слоевой модели.



Фиг. 24. Образец диаграммы ситового анализа.



Фиг. 25. Диаграмма ситового анализа при загрузке топлива с отражателем.



Фиг. 26. Общий вид слоевой подвижной модели.

испытания. В задней стенке модели расположены на равном расстоянии друг от друга вертикальные щели 1, в которые вставлены металлические затворы-разделители. Засыпка модели производится отдельно. Прежде засыпается зольная подушка 2, а вслед за этим на образовавшийся зольный слой засыпается основное топливо 3. Перед засыпкой топливо должно быть подготовлено. Подготовка заключается в создании в определенном масштабе и в определенных соотношениях зерна такой величины, которая бы отвечала структуре слоя натурального топлива.

Засыпку топлива осуществляют в несколько приемов. Когда загружено достаточное количество топлива, затворы проталкивают через щели и, таким образом, разделяют слой топлива в модели на ряд вертикальных секций или „гнезд“.

Содержимое каждого гнезда удаляют и производят его ситовой анализ. Результаты ситового анализа выражаются в виде вычерченных в определенном масштабе диаграмм; образец одной из них приводится на фиг. 24.

Количество зерен топлива каждой величины в данном гнезде представлено на диаграммах в виде прямоугольников, заштрихованных для крупного материала и незаштрихованных для более мелкого. Пунктиром на диаграмме показан контур топливного слоя, снятый с модели и соответствующий данному распределению зерен в гнезде.

Применяя различные виды загрузочных устройств конусов и отражателей, можно получить различные диаграммы фракционирования кусков топлива и контуры топливного слоя. Например, установка отражателей заставляет крупные куски топлива отскакивать от стенки, а мелочь осаживать около стенки шахты, обеспечивая периферию от прорыва газа и воздуха. Это иллюстрируется диаграммой ситового анализа на фиг. 25.

Опыты с такого рода моделями, между прочим, приводят к выводу о том, что характер распределения компонентов в слое определяется: а) процессом загрузки и б) перераспределением компонентов, вызванных катанием.

При работе со слоевой моделью дает хорошие для наблюдения и фотографирования результаты „подкрашивание“ слоя угля белыми кусочками мрамора, представляющими в то же самое время определенную фракцию зерна топлива в слое.

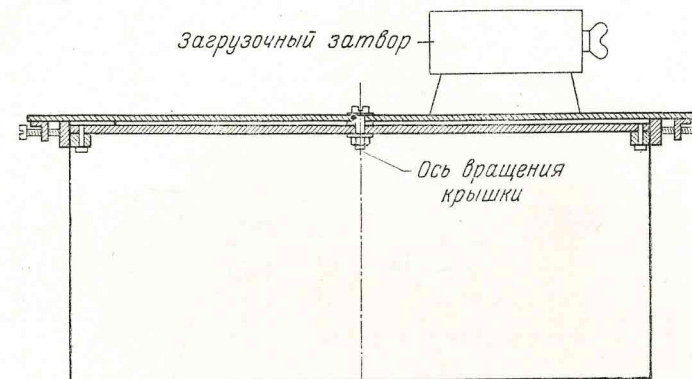
Значительный интерес при исследовании представляют, кроме статических моделей, подвижные модели. Общий вид такой модели представлен на фиг. 26. Устройство дефлекторов и разного рода отражателей, одинарных и двойных загрузочных конусов, дает возможность значительно разнообразить эксперимент и находить нужные для образца решения.

### Цилиндрические модели

Слоевая плоская модель, давая представление о распределении материала, не может дать точной картины распределения в круглой шахте газогенератора. Иными словами, слоевая модель не отвечает

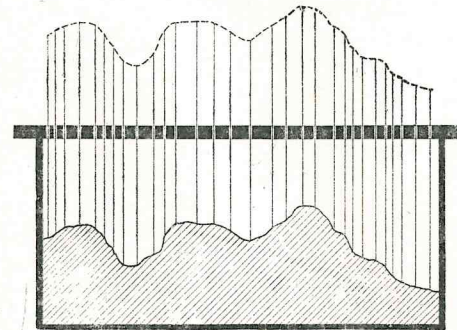
условиям геометрического подобия. Основная ошибка здесь получается за счет центральных областей слоя, которые должны увеличиваться быстрее, чем в плоских моделях.

Статические круговые опыты можно ставить с моделью, схема которой приведена на фиг. 27.

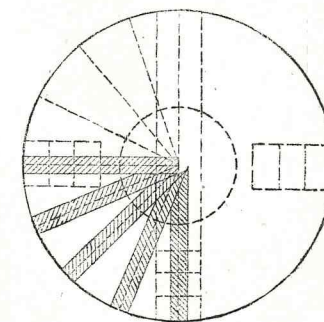


Фиг. 27. Схема цилиндрической модели.

Модель состоит из плиты-основания с расположенным над ней мостиком. Между стойками мостика движется поперечная распорка, на которой смонтирован загрузочный механизм. Распорку можно ставить в любое из пяти вертикальных положений.



Фиг. 28. Схема определения профиля засыпки слоя проволоочными нитями.



Фиг. 29. Диаграмма отбора проб в цилиндрической модели.

Загрузочный механизм состоит из цилиндрической приемной воронки, зажатой в центральном положении при помощи опор и регулируемых винтов. Дно воронки закрывается подвижным конусом, а верх закрывается обратным конусом. Вершина этого второго конуса просверлена и служит для обеспечения симметричности загрузки.

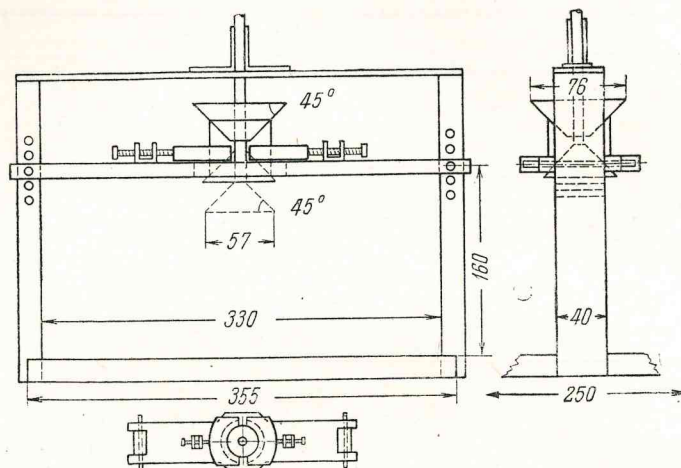
На плите модели устанавливается цилиндрический бак с засыпанным первоначальным слоем топлива. Профиль засыпки топлива в слое



определяется проволочными нитями (фиг. 28) по трем-четырем диаметрам и потом наносится на бумагу.

Пробы топлива для ситового анализа берутся при помощи узких полых железных кассет, врезаемых в слой топлива модели.

На фиг. 29 приведена диаграмма слоя цилиндрической модели, показывающая характер распределения слоя (по радиусам) и места отбора ситовых проб.



Фиг. 30. Схема цилиндрической модели для моделирования процесса распределения топлива в газогенераторе с вращающейся решеткой.

При исследовании на модели процесса распределения топлива в промышленных газогенераторах с вращающимися решетками или наблюдении за работой мешалок и дефлекторов необходимо привести в движение не днище, а верхнюю часть модели с загрузочным приспособлением.

На фиг. 30 приведена схема такой цилиндрической модели для моделирования процесса распределения топлива в газогенераторе с вращающейся решеткой.

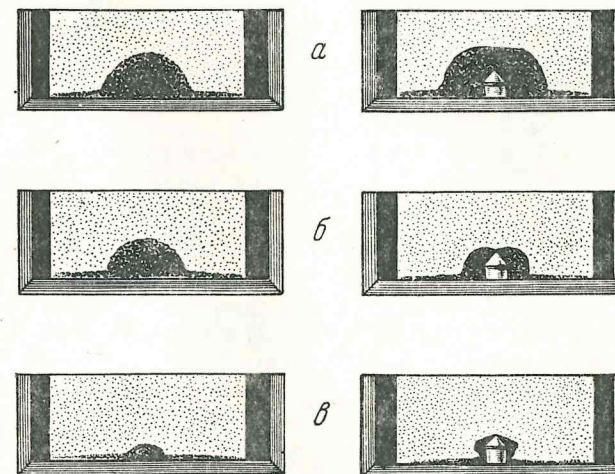
Таким образом, рассмотренные выше слоевые модели дают возможность исследовать характер распределения топлива в статическом и подвижном слоях и в результате исследования рекомендовать для образцов такие практические решения, при которых большинство конструктивных элементов газогенераторов оказывается проверенным.

## ГЛАВА СЕДЬМАЯ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА В СЛОЕ ЗАСЫПКИ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

#### Газовый поток в однородном слое

Процесс прохождения газа через однородный слой изучался на плоской стеклянной модели [24] с сетчатым дном, имитирующим колосниковую решетку. Газ подводился через трубку диаметром 5 мм.



Фиг. 31. Моделирование процесса дутья через слой однородной засыпки топлива.

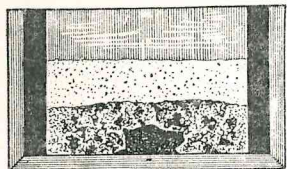
Результаты наблюдений приведены на шести последовательных фотографиях (фиг. 31).

В случае равнопроницаемого слоя топлива, черный полукруг, видимый на фотографиях, как след от проходящего газа, развивается равномерно.

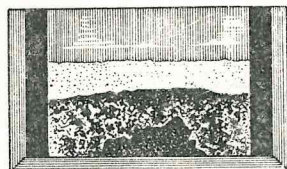
## Газовый поток в двух слоях неоднородной зернистости

На фиг. 32 приведены результаты наблюдения за распределением дутья в модели, состоящей из двух слоев засыпки.

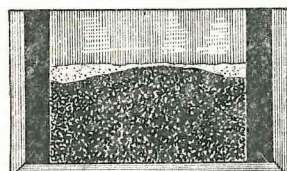
Подлежащая изучению засыпка поддерживалась слоем более крупных мраморных крошек. Из последовательно приведенных снимков *а*, *б* и *в* видно, что фронт дутья распространяется горизонтально, постепенно поднимаясь к засыпке. Потока дутья вдоль стенок не замечалось.



*а*



*б*



*в*

Фиг. 32. Моделирование дутья через двойной слой засыпки топлива.

На фиг. 33 приведено распределение дутья в слое, созданном путем засыпки топлива из двух загрузочных аппаратов. Контур слоя топлива образуется двумя конусами; в процессе засыпки более крупные частицы топлива расположились в большей своей массе ближе к стенкам и центру засыпки.

Движение фронта дутья показывает, что в этапах *б* и *г* оно достигает стенок и движется вдоль них значительно раньше, чем достигает центральных областей слоя.

Значительное понижение загрузочного конуса дает такое распределение частиц топлива, при котором проницаемость засыпки становится более равномерной. В результате других опытов, приведенных на фиг. 36, мы замечаем почти горизонтальное движение фронта дутья с полной локализацией движения дутья вдоль стенок.

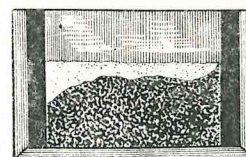
На фиг. 33 видно распределение дутья в случае зашлаковывания правой стенки. В этом случае отчетливо видно искривление потока дутья и направление его вдоль зашлакованной стенки модели.

На фиг. 34 приведено распределение дутья в слое в том случае, когда зернистость засыпки, поддерживающей основной слой, вдвое крупнее, чем в опытах, приведенных на фиг. 32. Здесь мы наблюдаем вместо горизонтального — вертикальное развитие фронта дутья.

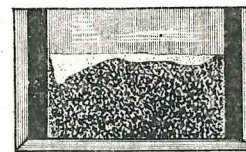
Такие условия практически можно наблюдать при газификации малозольного спекающегося угля с высокой температурой плавления золы. Прорыв дутья вдоль стенок в этих условиях вряд ли возможен.

### Влияние зернистости топлива на движение дутья вдоль стенки

Фиг. 32 и 34 показывают, что в слое с сравнительно однородной засыпкой почти не наблюдаются случаи движения дутья вдоль стенки. Дутье сравнительно равномерно пронизывает весь слой засыпки.

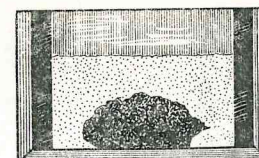


*а*

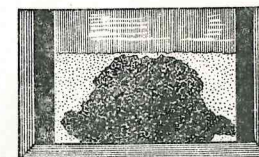


*б*

Фиг. 33. Моделирование дутья через слой топлива в случае зашлаковывания одной стенки.

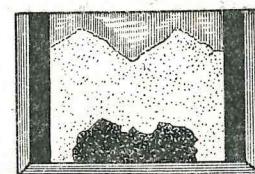


*а*

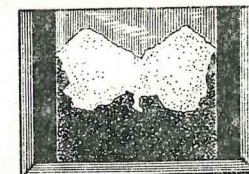


*б*

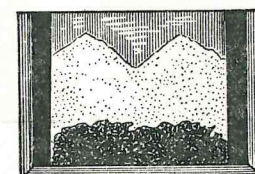
Фиг. 34. Моделирование дутья через слой крупного топлива.



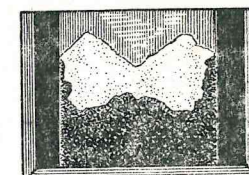
*а*



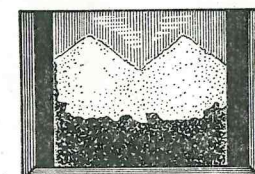
*г*



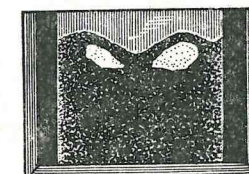
*б*



*д*

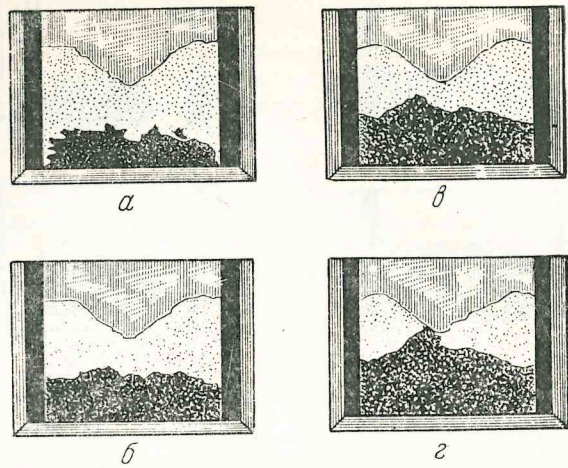


*в*

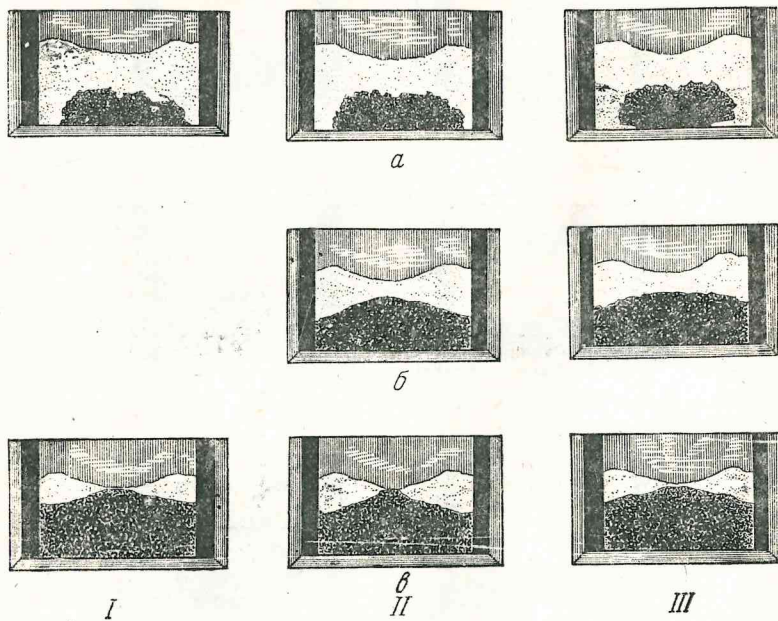


*е*

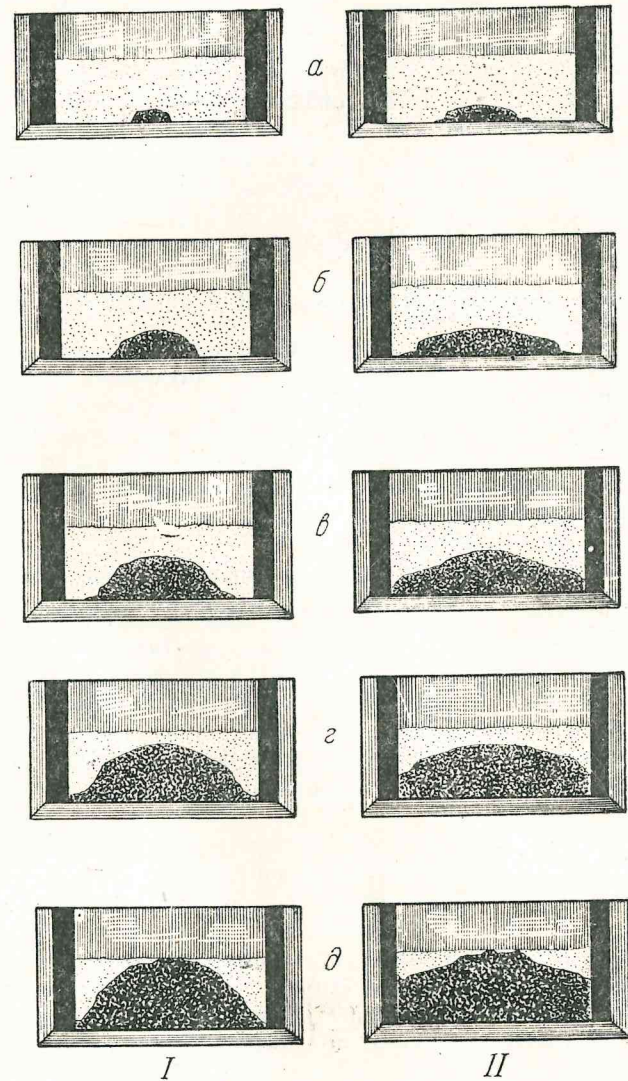
Фиг. 35. Моделирование дутья через слой топлива, создаваемый загрузкой из двух загрузочных аппаратов.



Фиг. 36. Горизонтальное развитие фронта дутья.



Фиг. 37. Моделирование движения фронта дутья для трех скоростей: I — средней, II — быстрой, III — медленной.



Фиг. 38. Характер развития фронта дутья в напластованных слоях для двух скоростей дутья: I — средней, II — выше средней.

## Моделирование работы дефлектора

На характер распределения топлива в шахте газогенератора значительное влияние оказывают всевозможные отражающие приспособления, козырьки, или так называемые дефлекторы.

Моделирование эффекта работы дефлектора показывает, что при умелом его использовании можно добиться значительных успехов в характере распределения дутья топлива в газогенераторе. На фиг. 37 приведено распределение фронта дутья в слое топлива для трех скоростей дутья: средней (*a*), быстрой (*b*) и медленной (*в*). Очертание фронта дутья во всех трех случаях отличается незначительно, однако следует считать, что увеличение скорости дутья благоприятно отражается на центральных областях слоя топлива.

### Газовый поток в напластованных неоднородных слоях

Движение газового потока в напластованных слоях различной зернистости отличается, главным образом, степенью проницаемости материала, через который проходит газовый поток. При этом, с увеличением скорости дутья, степень проницаемости улучшается. На фиг. 38 приведены две серии фотографий прохождения газового потока и его очертания в слое для двух скоростей дутья — средней (*I*) и выше средней (*II*).

### Влияние скорости дутья в опытах с моделями

При опытах с моделями расход газа колеблется в пределах 0,15—0,35 л/мин. Повышение расхода существенно не сказывается на результатах опыта. Вместе с тем следовало бы получать скорости, при которых значение числа Рейнольдса  $Re$  было бы сравнимо с значением, получаемым при работе действительного газогенератора. Однако в опытах с моделями это потребовало бы весьма значительного увеличения скоростей, что практически представляет большие затруднения.

Это обстоятельство заставляет в опытах с моделями пренебречь значениями плотности и вязкости газового потока и таким образом заранее внести некоторое искажение в картину динамического подобия.

Увеличение скоростей распространения фронта дутья в слое незначительно влияет на форму фронта дутья центральных областей слоя. Изломов фронта совершенно не наблюдается. Движение дутья носит турбулентный характер при относительно низких значениях величины  $Re$ .

Вместе с тем высокие скорости снижают явления диффузии и дают лучшую аэродинамическую картину, более близкую к реальным условиям работы газогенератора.

Высокие скорости дутья в модели при работе с цветными индикаторами создают более четкие границы съемки, не давая отставать цветному контуру от границ движения дутья.

## О некоторых выводах по моделированию газового потока в слое

Результаты моделирования газового потока в слое засыпки могут быть сведены к следующим положениям.

1. Движение газа через слой топлива равной зернистости создает полукруглый фронт волны.

2. В неоднородном слое топлива значительное влияние на фронт движения газа оказывает величина зернистости: чем больше отношения размеров зернистости, тем больше они сказываются на фронте движения газа.

3. Изменение скорости газа по существу не влияет на очертание фронта волны.

4. Сравнительно небольшие изменения загрузочных устройств и конуса разброса топлива в газогенераторе значительно изменяют направление и очертание фронта движения газа.

5. Проницаемость зольной подушки и основного топливного слоя играет большую роль в распределении фронта движения газа.

Пористый зольный слой расширяет фронт движения газа. Понижение пористости нижних слоев (зола) и повышение пористости верхних сужает фронт движения газа, который имеет склонность перемещения к центральным областям.

6. Отражательные приспособления (дефлекторы) значительно улучшают распределение кусков топлива в газогенераторе и улучшают аэродинамику слоя.

7. Движение (прорыв) газа вдоль стенки шахты (периферийный газ) тем меньше, чем более однородна загрузка топлива. Сосредоточение крупного неоднородного материала около стенок газогенератора повышает выход периферийного газа, и этот выход тем больше, чем больше разница в соотношении размеров топлива в этих горизонтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев М. А. Развитие метода теплового моделирования за 25 лет. Сборник „Теория подобия и моделирования“. АН СССР, М. 1951.
2. Кирпичев М. В. и Конаков П. К. Математические основы теории подобия. АН СССР, 1949.
3. Ehrenfest-Afanassiewa. Der Dimensionsbegriff und der analytische Bau physikalischer gleichungen. Matematische Annalen, LXXVII, Band, Heft 2. 1915.
4. Кирпичев М. В. Теория подобия, как основа эксперимента. Сборник „Юбилейная сессия Академии Наук СССР“, т. 2, 1947.
5. Buckingham F. The Phys. Rew, II Ser, Vol. 4 (1914).
6. Федерман А. О некоторых общих методах интегрирования уравнений с частными производными первого порядка. „Изв. СПб политехнического института“, 1911, т. XVI, вып. I.
7. Кирпичев М. В., Гухман А. А. Применение теории подобия к опыту. „Труды Ленинградского технологического института“, вып. I, 1931.
8. Кирпичев М. В. О теплопередаче в котлах. В книге „Успехи тепловой техники“ НХТИ НТО ВСНХ, 1924.
9. Кирпичев М. В. и Михеев М. А. Моделирование тепловых устройств, АН СССР, 1936 г.
10. Коллеров Л. К. Газомоторные установки, Машгиз, 1951.
11. Хардов З. А. и Генин А. Б. Судовые газосиловые установки, Издательство Минречфлота, 1951.
12. Коллеров Л. К. К вопросу расчета камеры газификации для мелкозернистого растительного топлива, Труды ЦНИДИ, вып. 19, Машгиз, 1951
13. Вознесенский Н. П. Легкие газогенераторы, ОНТИ, 1938.
14. Гинзбург Д. Г. Газификация низкосортного топлива, Промстройиздат, 1950.
15. Дьяконов Г. К. „Доклады АН СССР, Отдел технических наук“, т. 39, вып. 4, 1943.
16. Бересков Г. К. „Журнал физической химии“, № 11—12, 1945.
17. Готгельф И. М. Моделирование в применении к вентиляторостроению. Сборник „Теория подобия и моделирования“, АН СССР, 1951.
18. Иванцев Г. П. Перспективы применения метода моделей в металлургии. АН СССР, 1938.
19. Сахаров А. А. Высокоскоростная киносъемка, Госкиноиздат, 1950.
20. Михеев М. А. Исследование сопротивлений плоских поворотов. „Тепло и сила“, № 4, 1933.
21. Получение и определение меченых атомов. Сборник статей. Перевод с английского. ИЛ, 1948 г.
22. Швайцер Г. и Уитни И. Техника применения радиоактивных изотопов. ИЛ, 1951 г.
23. Радиоактивный распад и медицина. Перевод с английского. ИЛ, 1951 г.
24. Hughes ML. Experiments an Gas Flow in Producer Fuel Beds „Iron and Steel Institut“, 1947.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Глава первая. Теория подобия, как основа эксперимента . . .	7
Общие понятия о подобии явлений . . . . .	—
Три теоремы подобия . . . . .	8
Метод теплового моделирования . . . . .	10
Глава вторая. Объекты моделирования в газогенераторной установке . . . . .	14
О процессах, протекающих в газогенераторе . . . . .	—
Моделирование физико-химических превращений . . . . .	17
Моделирование гидравлических характеристик . . . . .	19
Моделирование загрузки в газогенераторе . . . . .	23
Моделирование охлаждения и очистки газа . . . . .	24
Моделирование теплообмена . . . . .	26
Огневое моделирование . . . . .	28
Глава третья. Некоторые указания о расчете и конструировании моделей . . . . .	30
Глава четвертая. Изучение движения газа и воды в элементах газогенераторной установки при моделировании . . . . .	33
Глава пятая. Техника измерений при моделировании . . . . .	39
Определение расхода в водяных моделях . . . . .	—
Измерение давлений в водяных моделях . . . . .	40
Измерение скоростей в воздушных моделях . . . . .	41
Измерение температур . . . . .	42
Измерение количества тепла . . . . .	43
Метод меченых атомов . . . . .	44
Глава шестая. Моделирование засыпки в газогенераторе . . .	58
Метод слоевой модели . . . . .	—
Цилиндрические модели . . . . .	60
Глава седьмая. Моделирование газового потока в слое засыпки газогенератора . . . . .	63
Газовый поток в однородном слое . . . . .	—
Газовый поток в двух слоях неоднородной зернистости . . . . .	64
Влияние зернистости топлива на движение дутья вдоль стенки . . . . .	—
Моделирование работы дефлектора . . . . .	68
Газовый поток в напластованных неоднородных слоях . . . . .	—
Влияние скорости дутья в опытах с моделями . . . . .	—
О некоторых выводах по моделированию газового потока в слое . . . . .	69
Литература . . . . .	70

Корректор *В. А. Белехов*

---

Подписано к печати 21/X 1952 г. М-47201. Формат бумаги 60 × 92/16  
Печ. листов 4 1/2. Уч.-изд. листов 4,39. Тираж 2000 экз. Заказ 2897.  
Номинал — по прейскуранту 1952 года

---

1-я типография Машгиза. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

026 - 1

9к - 1