

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПКИ АЭРОФОНТАННОГО ТИПА

Н. ШИПКОВ

Успешная проверка в условиях длительной работы аэрофонтанной топki на опытно-промышленной установке по переработке сланцевой мелочи методом твердого теплоносителя в г. Кивиули определила целесообразность постановки специального исследования, направленного на выявление оптимальной аэродинамической схемы топок данного типа, их геометрических и режимных параметров, а также области их возможного и рационального применения.

Проведение такого исследования на действующих агрегатах сопряжено с большими практическими трудностями. Поэтому наряду с экспериментальным исследованием работы действующей опытно-промышленной топki, исследование аэродинамических характеристик аэрофонтанных камер было выполнено на холодных моделях. Результаты опытов, посвященные выявлению оптимальных геометрических и режимных параметров камеры, будут изложены отдельно. Ниже приводятся результаты первой части исследования, включающей:

- а) экспериментальное изучение показателей работы действующей топki;
- б) то же, на геометрически подобной модельной камере;
- в) обоснование условий подобию и моделирования изучаемых явлений;
- г) сопоставление в критериальной форме показателей работы действующей топki и модели по достигнутой концентрации материала и сопротивлению камеры.

Опытно-промышленная топка и основные показатели ее работы

Испытанная аэрофонтанная камера сгорания является элементом опытно-промышленной установки для переработки сланцевой мелочи методом твердого теплоносителя. Назначение топki в данной схеме — нагрев мелкозернистого твердого теплоносителя (озоленного полукокса). Общий вид камеры сгорания представлен на рис. 1. Отличительной особенностью данного типа камеры является подача топлива, совместно с воздушным дутьем, через нижнее устье конуса и установка в верхней части камеры стабилизатора взвешенного слоя. Последний выполнен в виде завихрителя с глухой центральной частью и четырьмя наклонными лопастями, полностью перекрывающими сечение в плане. Такая аэродинамическая схема камеры обеспечивает достижение высокой концентрации взвешенного материала в объеме топki и устойчивый режим фонтанирования.

Камера футерована и не имеет охлаждающих поверхностей.

Бесшлаковочный режим обеспечивается ограничением температуры в топке 800—850° С, что достигается за счет работы с высокой концентрацией материала в объеме камеры.

При указанных на рис. 1 размерах и объеме $V=2,7 \text{ м}^3$ топка перерабатывает в час 10—18 тонн сланцевого полукоккса размером 0—12 мм с начальной температурой 450—480° С зольностью $A_c=95\text{—}96\%$. Видимое тепловое напряжение объема камеры достигает 2 млн ккал/м³·час, расход горящего топлива через максимальное сечение камеры достигал 17,5 т/м²·час. Длительность непрерывной работы установки составляет 20 суток, причем никогда не ограничивалась работой топки. Суммарно топка проработала более 4000 часов.

В табл. 1 приведены показатели работы топки по данным одного из типичных опытов, проведенных при средних значениях нагрузки.

Как следует из таблицы, одной из особенностей испытанной топки являются относительно небольшие пределы изменения температуры по высоте камеры.

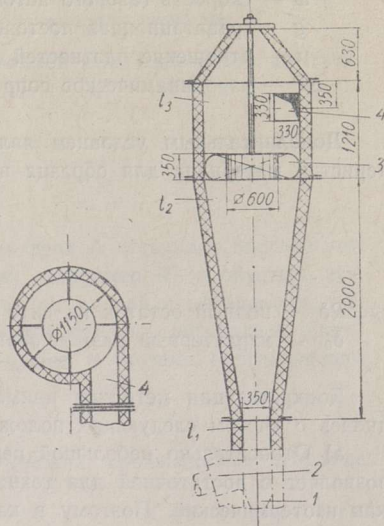


Рис. 1. Испытанная опытно-промышленная аэрофонтанная топка.

1 — ввод воздушного дутья; 2 — ввод топлива; 3 — стабилизатор взвешенного слоя; 4 — вывод аэровзвеси.

Таблица 1

Показатели работы топки при средней нагрузке

| Наименование | | Обозначение | Размер | Величина |
|---|------------------------|-------------|----------------------|----------|
| Исходное топливо | Влажность | W_p | % | 0 |
| | Зольность | A_c | % | 96 |
| | Температура полукоккса | $t_{пк}$ | °С | 450 |
| | Расход | B | кг/час | 11500 |
| Воздушное дутье | Температура | t_v | °С | 50 |
| | Расход | V_v | нм ³ /час | 2970 |
| Температуры по высоте топки | | t_1 | °С | 620 |
| | | t_2 | °С | 700 |
| | | t_3 | °С | 794 |
| Средняя весовая концентрация топлива в объеме топки | | μ_k | кг/нм ³ | 180 |

Методика моделирования

В основу методики моделирования были положены условия подобия, разработанные Н. И. Зверевым — ВТИ [1].

Обработка замкнутой системы уравнений, описывающей установившееся движение запыленного газового потока полидисперсной системы, дает следующие критерии:

$$\Delta = \frac{\delta(Q_2 - Q_1)}{I_{Q_1}}; \quad R = \frac{w\delta}{v}; \quad Fr = \frac{w^2}{gl}; \quad \mu; \quad Eu = \frac{\Delta P}{Q_1 w^2},$$

где ρ_2 ; δ — плотность и размер частицы,
 l — характерный размер потока,
 ρ_1 ; ν — плотность и вязкость газа,
 w — скорость газового потока,
 g — гравитационная постоянная,
 μ — отношение плотностей дисперсида и газа,
 ΔP — аэродинамическое сопротивление системы.

Дополнительным условием является совпадение относительных зерновых характеристик материала для образца и модели в форме

$$R\delta = f\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right),$$

где $R\delta$ — полный остаток на сите размером δ ,
 δ_0 — характерный размер зерновой характеристики.

Конкретизация методики применительно к решению поставленной задачи проводилась с учетом следующих положений:

а) Относительно небольшой перепад температур по высоте камеры (150—180°С) позволяет с достаточной для технических расчетов точностью рассматривать процесс как изотермический. Поэтому в качестве определяющей величины температуры процесса была принята среднеарифметическая температура в устье конуса и на выходе из топki.

б) Правомерность моделирования движения горящих топливных частиц холодным материалом обусловлена малой скоростью и степенью выгорания индивидуальной частицы в камере при низкотемпературном режиме горения и большими весовыми концентрациями топлива.

в) Величина дутьевой форсировки и устойчивость режима работы аэрофонтанной топki в значительной степени определяются размером наибольших частиц топлива. Это объясняется необходимостью достаточного разгона крупных частиц с целью предотвращения баллаستировки ими камеры топki. Исходя из этого, а также из методического удобства приготовления модельного материала путем просева через сито заданного «максимального» размера, наиболее правильным было бы принять в качестве определяющего размера зерновой характеристики размер наибольших частиц. Однако в практических условиях методика рассева зернистых материалов часто оставляет размер наибольших частиц неопределенным. Поэтому за определяющий размер был принят размер сита, остаток на котором равен 10%.

г) В качестве геометрической определяющей величины был принят диаметр устья конуса камеры — $d_{вх}$. Это было вызвано тем, что при изучении влияния геометрических параметров камеры на ее работу только $d_{вх}$ оставался неизменным.

Определяющей скоростью была принята скорость воздуха в сечении устья конуса — $w_{вх}$, определяющей безразмерной концентрацией — концентрация на входе в камеру

$$\mu_{вх} = \frac{B}{V_2 \gamma_2},$$

где

B , кг/час — величина подачи зернистого материала в камеру,
 V_2 , м³/час и γ_2 , кг/м³ — расход и удельный вес дымового газа.

Все величины, относящиеся к газовому потоку, были приняты при средней по высоте топki температуре. Плотность и вязкость дымового газа принимались равными таковым для воздуха при тех же условиях. Это упрощение приводит к расхождению названных величин не более чем на 3%, что соответствует еще меньшему расхождению при подсчете критериев подобия.

д) Предварительные опыты по продувке действующей топки и их обработка в форме зависимости $Eu = f(Re)$ показали автомодельность явления от Re , что позволило исключить его из числа определяющих критериев.

е) При проведении всех опытов на одной модели каждому значению критерия Фруда (при постоянном Δ) соответствует определенное значение критерия R .

Таким образом, число определяющих критериев может быть сокращено до трех. Для этого образуем производный критерий A .

$$A = \frac{Fr}{R^2} \cdot \Delta^2 = \frac{v^2 \cdot Q_2^2}{g l^3 Q_1^2}.$$

Так как для всех опытов на холодной модели критерий A оставался постоянным, оказалось возможным заменить им один из критериев (например R) и опустить его.

Величины, входящие в критерий Δ во всех опытах на модели с материалом, моделирующим по зерновому составу и плотности натурное топливо, оставались постоянными. Таким образом, критерий Δ может быть опущен и система определяющих критериев примет вид

$$\mu_{вх}; Fr.$$

Обработка результатов опытов соответственно должна производиться в форме зависимостей вида

$$\mu_k = f(\mu_{вх}; Fr) \quad (1)$$

$$Eu = f(\mu_{вх}; Fr), \quad (2)$$

где $\mu_k = \frac{G_k}{V_k v_2}$ — безразмерная концентрация материала в камере,

$G_k, кг$ — количество материала, одновременно находящегося в камере,

$V_k, м^3$ — объем камеры.

Методика эксперимента

Схема экспериментального стенда и измерений представлена на рис. 2. Размеры камеры, пределы изменения основных режимных параметров и фракционный состав выбраны на основании пересчета размеров действующей топки и показателей ее работы, приведенных в табл. 1.

Расчет показал, что при работе модельной камеры на холодном воздушном дутье ($t_{в} = 30^\circ C$) с расходами дутья и зернистого материала, отвечающими пределам изме-

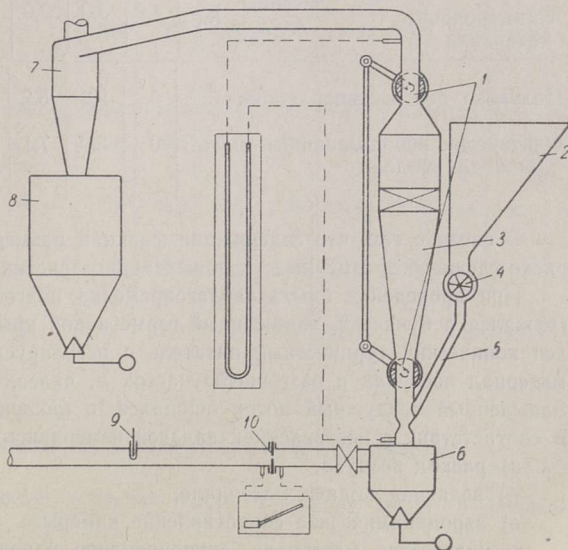


Рис. 2. Схема экспериментального стенда.

1 — отсекающие пробковые краны; 2 — бункер исходного материала; 3 — камера; 4 — турникетный питатель; 5 — течка; 6 — бункер провала; 7 — циклон; 8 — бункер; 9 — термометр; 10 — нормальная диафрагма.

нения таковых в действующей топке и зерновой характеристике материала, приведенной в табл. 2 для создания аэродинамического явления, подобного описанному в табл. 1, оказалось необходимым выдержать коэффициент геометрического подобия равным 7. Отсюда и были определены все геометрические размеры камеры.

Таблица 2

Зерновые характеристики полукокса

| Наименование материала | Форма характеристики | Полный остаток на ситах, % | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|------------|-----------|-----|
| | | R_{12} | R_7 | R_5 | R_3 | R_2 | R_1 | $R_{0,5}$ | $R_{0,25}$ | $R_{0,1}$ | 0,0 |
| Полукок действующей топки | Средняя по ситовым анализам | 0 | 2,7 | 5,2 | 8,7 | 12,6 | 21,4 | 32,0 | 44,9 | 63,1 | 100 |
| Материал для модели | Расчетная Фактически использованная | 0 | 0 | 0 | 2,7 | 5,3 | 10,9 | 19,6 | 30,1 | 47,6 | 100 |
| | | 0 | 0 | 0 | 3,7 | 7,8 | 17,0 | 28,5 | 42,1 | 61,2 | 100 |

В качестве зернистого материала использовался холодный сланцевый полукок, тот же, что и для образца ($\gamma_{\text{каж}} = 1500 \text{ кг/м}^3$), имеющий зерновую характеристику, несколько отличную от расчетной (см. табл. 2). Это было вызвано техническими трудностями приготовления большого количества исходного зернистого материала с заданной зерновой характеристикой. Поэтому было решено отсеевать от полукокса, поступающего в образец, фракцию размером менее 5 мм и использовать ее в качестве модельной.

В табл. 2, 3 приведены расчетные и имевшие место в опытах безразмерные зерновые характеристики исходного материала.

Таблица 3

Безразмерные зерновые характеристики полукокса

| Наименование материала | Относительный размер частицы, $\frac{\delta}{\delta_0}$ | | | | | | | | | |
|--|--|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| | 4,8 | 3,0 | 2,0 | 1,0 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,0 |
| Полукок действующей топки | 0 | 2,2 | 5,2 | 10,3 | 18,0 | 25,7 | 32,0 | 44,9 | 59,5 | 100 |
| Фактически использованный мате- риал для модели | 0 | 3,0 | 7,1 | 16,5 | 28,0 | 37,5 | 45,0 | 60,0 | 73,5 | 100 |

В связи с тем, что содержание фракции размером более 5 мм не превышает 5%, расхождение безразмерных зерновых характеристик невелико.

При проведении опыта заблаговременно подготовленный зернистый материал загружался в бункер 2, снабженный герметичной крышкой. Под бункером был установлен конический турникетный питатель с регулируемым числом оборотов. По течке 5 материал поступал в разгонный участок и, далее, совместно с воздухом в камеру 3. Запыленный воздушный поток очищался в циклоне 7 и сбрасывался в атмосферу. В соответствии с поставленной задачей измерялись

- расход воздуха,
- величина подачи материала,
- аэродинамическое сопротивление камеры,
- количество материала, одновременно находящегося в объеме камеры.

Последнее определение велось методом «мгновенной отсечки» камеры с последующим взвешиванием отсеченного материала. Для этой цели на входе и выходе камеры были установлены специальные пробковые краны, внутреннее сечение которых совпадало с сечением разгонного участка и выходного канала. Приводные рычаги кранов были соединены между собой общей штангой 15. «Отсечка» камеры производилась за время меньшее чем 0,006 сек.

Все опыты были проведены при установившихся режимах работы камеры. Времена стабилизации режимов были определены в специально поставленной методической серии опытов [2].

При испытаниях действующей топki определялись ее аэродинамическое сопротивление, распределение температур по высоте камеры и средние весовые концентрации материала в объеме камеры. Последнее проводилось путем «мгновенной отсечки» объема топki и последующего взвешивания выгруженного материала.

Результаты испытаний действующей топki приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сопоставление показателей работы модели и действующие топki

| Характеристика топлив | Обозначение | Размер | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--|---------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Средняя температура по высоте камеры | Θ_{cp} | °C | 780 | 755 | 760 | 720 | 715 | 715 | 700 | 710 | 700 |
| Расход воздушного дутья при Θ_{cp} | V_v | м³/час | 9400 | 10250 | 10100 | 9550 | 10250 | 9800 | 11640 | 10250 | 12500 |
| Расход топлива | B | кг/час | 11850 | 11150 | 10800 | 12500 | 10900 | 11300 | 12000 | 13900 | 13120 |
| Безразмерная концентрация топлива на входе в камеру | $\mu_{вх}$ | — | 3,78 | 3,15 | 3,10 | 3,70 | 3,00 | 3,25 | 2,85 | 3,80 | 2,90 |
| Критерий Фруда | Fr | — | 220 | 260 | 255 | 230 | 270 | 245 | 330 | 260 | 395 |
| Весовая концентрация материала в объеме действующей топki | μ | кг/м³ | 200 | 141 | 148 | 173 | 124 | 144 | 119 | 93 | 103 |
| Безразмерная концентрация в объеме топki по данным испытаний действующей топki | $\mu_k^{об}$ | — | 600 | 410 | 430 | 490 | 350 | 405 | 335 | 480 | 285 |
| Безразмерная концентрация в объеме топki по данным холодной модели | $\mu_k^м$ | — | 480 | 360 | 355 | 450 | 335 | 380 | 290 | 450 | 260 |
| Невязка | | % | +25,0 | +14,0 | +24,0 | +9,0 | +4,5 | +6,6 | +15,5 | +6,7 | +9,6 |
| Аэродинамическое сопротивление действующей топki | Δp | мм в. ст. | 850 | 800 | 840 | 850 | 780 | 820 | 800 | 760 | 840 |
| Критерий Эйлера по данным испытаний действующей топki | $Eu^{об}$ | — | 34 | 26,2 | 27,9 | 31 | 24,4 | 27,3 | 19 | 23,7 | 17,4 |
| Критерий Эйлера по данным холодной модели | $Eu^м$ | | 35 | 32,2 | 32,5 | 34,5 | 31,4 | 33 | 27,7 | 31,1 | 23,2 |
| Невязка | | % | -2,8 | -18,5 | -14,1 | -10,1 | -22,4 | -19 | -29 | -20,5 | -25 |

Результаты опытов и их критериальная обработка

Исследовалось влияние скорости дутья на входе в камеру ($w_{вх}$) и величина подачи зернистого материала (B).

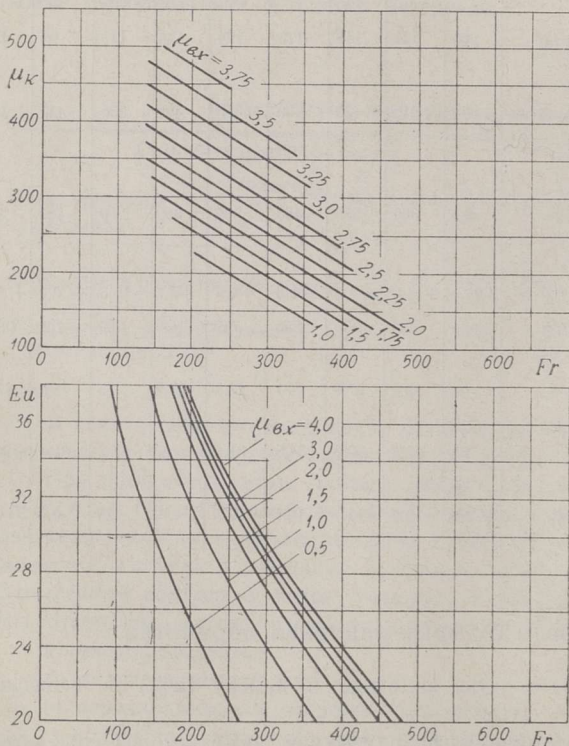
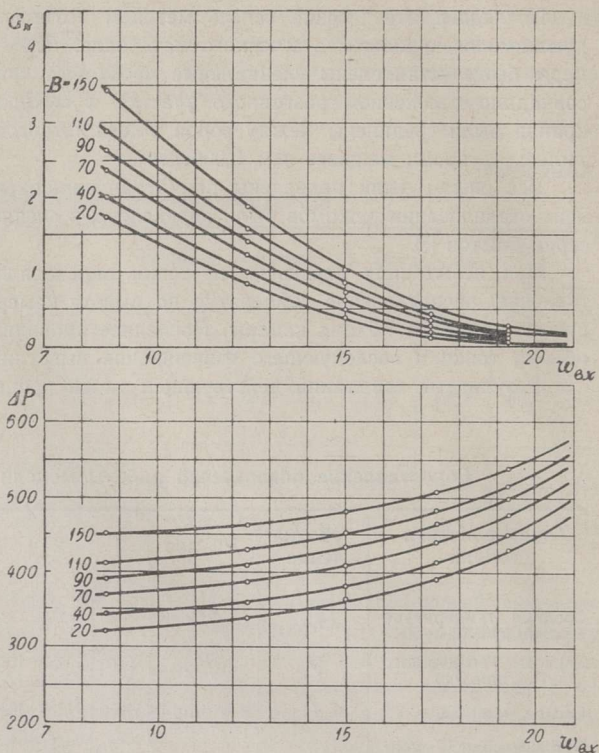
Скорость дутья изменялась от минимально возможной, ниже которой слой обва-

ливался в камеру, до скорости, практически соответствующей полному выносу циркулирующего материала из камеры.

Величина подачи материала изменялась от $B = 20$ кг/час до $B = 200$ кг/час. В качестве зернистого материала использовался сланцевый полукокс фракции 0—5 мм.

Полученная зависимость средней весовой концентрации материала в объеме камеры от скорости дутья на входе и величины подачи представлена на верхнем графике рис. 3.

Рис. 3. Зависимости аэродинамических показателей работы камеры от режимных параметров.



Из графика следует, что основное влияние на величину μ_k оказывает скорость дутья. Так, увеличение скорости дутья с 10 м/сек до 20 м/сек приводит к уменьшению концентрации материала в камере в 10—12 раз.

Зависимость μ_k от величины подачи материала, при постоянной $w_{вх}$ выражена значительно слабее.

Рис. 4. Зависимости аэродинамических показателей работы камеры от режимных параметров в критериальной форме.

На нижнем графике рис. 3 представлена зависимость аэродинамического сопротивления модельной камеры от скорости дутья на входе в камеру и величины подачи зернистого материала. Примерно постоянное значение ΔP на начальном участке кривых объясняется тем, что режим работы камеры при малых дутьевых форсировках близок к режиму кипящего слоя и рост ΔP камеры с ростом $\omega_{\text{вх}}$ за счет сопротивления камеры компенсируется уменьшением сопротивления слоя, вес которого с ростом $\omega_{\text{вх}}$ уменьшается.

Дальнейший рост ΔP вызывается сопротивлением камеры.

Полученные экспериментальные данные, с целью их обобщения и сопоставления с результатами испытания действующей топки — образца, были представлены в форме описанных выше критериальных зависимостей 1—2.

На верхнем графике рис. 4 представлены зависимости безразмерной концентрации материала в объеме камеры от безразмерной концентрации материала на входе в камеру и критерия А. На нижнем графике рис. 4 представлены зависимости от тех же величин критерия Эйлера.

Результаты сопоставления данных испытания модели и действующей аэрофонтанной топки

В табл. 4 приведены сопоставления величин безразмерной концентрации материала в объеме камеры и критерия Эйлера для модели и образца — действующей аэрофонтанной топки. Величины зависимых критериев подсчитаны при условиях, отвечающих подобию явлений в образце и модели, т. е. при равенстве определяющих критериев $\mu_{\text{вх}}$ и Fg .

Концентрация на входе в действующую топку подсчитывалась так же, как и в модели по расходам топлива и дутья.

Из табл. 4 следует, что невязка в безразмерных концентрациях в образце и модели не превышает 25%, а в величинах критерия Эйлера — 29%.

Положительный характер невязки при сопоставлении безразмерных концентраций может быть объяснен несколько завышенным, относительно образца, разгоном и, следовательно, заниженным выносом частиц. Это происходит в связи с тем, что при усреднении температуры по высоте камеры и подсчете скоростей при средней температуре, скорости газов в разгонном участке действующей топки ниже расчетных. Этот же фактор, очевидно, объясняет и отрицательный характер невязки при сопоставлении величин критерия Эйлера. Так как значительная часть сопротивления всей камеры определяется разгонным участком с диффузором, снижение скорости относительно расчетной приводит к увеличению критерия Эйлера.

Таким образом, результаты сопоставления показателей работы действующей аэрофонтанной топки и ее холодной модели могут служить основанием для применения изложенной методики при решении ряда технических задач, а также позволяют использовать полученные характеристики аэрофонтанной топки при проектировании аппаратов иного масштаба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Зверев, Моделирование движения полидисперсной пыли. Теплоэнергетика, № 7, 1957.
2. Н. Н. Шипков, А. В. Гаврилин, Стабилизация взвешенного слоя полидисперсной системы, ДВШ, № 1, 1959.

AEROFONTÄÄNKOLDE MODELLEERIMINE

N. Sipkov

Resümee

Aerofontäänkolde mudeli abil uuriti peenpõlevkivi ümbertöötamist tahke soojakandjaga. Peeneteralise tahke soojakandja (poolkoksituha) kuumendamiseks ettenähtud seda tüüpi põlemiskambri iseärasuseks on see, et kütus antakse koldesse koos õhuga läbi korpusse alumise ava, keevkihi stabilisaator aga asub kambri ülemises osas.

Artiklis kasutatakse tolmvooluste modelleerimise meetodikat, mis põhineb sarnasusel. Põhjendatakse kuumade kütuseosakeste liikumise modelleerimine külma materjaliga, kusjuures osakesed liiguvad kambri väikese kiirusega ning üksikosakeste ärapõlemise aste on madal.

Leitud seosed on kujutatud graafiliselt joonisel 3 ja üldistatud koordinaatidena joonisel 4.

G. M. Kržižanovski nim.
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse
17. IV 1961

MODELLING OF AN AIR FOUNTAIN FURNACE

N. Shipkov

Summary

A study was made, on a model, of an air fountain furnace with a solid heat-carrier, designed for the thermal treatment of fine-grained oil shale. The full (ashed semi-coke) passes together with the air-fountain through the lower opening of the furnace, and thus a stabilized floating layer is formed in the upper part of the furnace.

Methods of modelling ashed flows are discussed.

The author proves the correctness of the method of modelling the movement of burning fuel particles with cold material moving at a slow speed, while the rate of combustion of individual particles in the furnace is low.

The results obtained are presented in graphic schemes, fig. 3, and in generalized co-ordinates, in fig. 4.

Institute of Energetics
named after Krzhizhanovski

Received
April 17th, 1961