

В. ПРЕСС, А. ОТС

## ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ПЫЛЕВИДНОГО СЛАНЦА В ОТКРЫТОМ ФАКЕЛЕ

В большинстве случаев процесс горения топливной пыли происходит первоначально в двухфазных струях, выходящих из горелок. Обычно горение пылевидного топлива рассматривается проходящим через ряд промежуточных стадий, связанных с переносом тепла и массы, которые образуют сложную совокупность процесса горения. Отдельные стадии горения у многих топлив изучены довольно широко, в то же время их взаимоотношения с другими стадиями почти не затрагивались. Представляет интерес исследование процесса горения с целью установления этих взаимоотношений на последовательных стадиях горения в реальных топочных процессах. При изучении процесса горения с этой точки зрения одним из наиболее простых случаев является исследование горящего факела в открытом (неограниченном) пространстве.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования процесса горения пылевидного сланца в открытом осесимметричном факеле.

### 1. Методика исследований

Исследования проводились на экспериментальной установке с прямоточной горелкой (диам. сопла 27 мм) периферийного зажигания от стабилизатора, оборудованной электрическим воздухоподогревателем и шнековым питателем пыли.

Подробное описание установки приведено в [1]. Использованная полифракционная сланцевая пыль имела следующую характеристику: зольность исправленная  $A_{исп}^p = 46,7\%$ , содержание карбонатной двуокиси углерода  $(CO_2)_k^p = 17,3\%$ , влажность  $W^p = 0,9\%$ , нижняя теплота сгорания  $Q_n^p = 10\,500$  кдж/кг, остаток пыли на ситах  $R_{75} = 43,4\%$  и  $R_{210} = 2,0\%$ . Коэффициент избытка первичного воздуха в аэросмеси топлива  $\alpha_0$  варьировался в пределах 0,25—0,8, начальная температура аэросмеси  $T_0 = 373—623^\circ K$  и ее приведенная к нормальным условиям выходная скорость из сопла  $\omega_{он} = 1,57—3,60$  м/сек.

Исследовались следующие характеристики горения вдоль оси открытого факела:

- 1) концентрация отдельных газовых компонентов,
- 2) температура в факеле,
- 3) содержание углерода в пробах пыли, уловленных из факела.

Отбор газовых продуктов сгорания производился через охлаждаемую водой трубку в аспираторы для дальнейшего анализа в газоанализаторе

типа ВТИ-2. Был произведен неполный анализ газа, так как в продуктах сгорания опытами было установлено лишь незначительное по сравнению с  $RO_2$  и  $CO$  содержание метана, водорода и тяжелых углеводородов. Температура газов измерялась тремя градуированными термометрами ПП с различными диаметрами горячих спаев. Поскольку при измерениях четко выраженной зависимости между показаниями термометров и величинами диаметров их горячих спаев не наблюдалось, то расчетная температура определялась как среднеарифметическая из трех показаний. Пробы отбирались отсосной трубкой, охлаждаемой водой. Чтобы избежать возникновения точки росы в трубке, охлаждающая вода подогревалась до  $80^\circ C$ . После отбора пробы немедленно подсушивались в термостате при температуре  $105^\circ C$ , и в дальнейшем в них определялось содержание органического углерода и водорода. Исходя из предположения о неизменности массы золы минеральной части сланцев в ходе горения, была рассчитана степень выгорания топлива:

$$\eta_c = 1 - C^c \cdot A_0^c / A^c \cdot C_0^c. \quad (1)$$

При этом

$$A^c = 100 - [C^c + H^c + (CO_2)_k^c]. \quad (2)$$

## 2. Характеристики горения

В работе [1] рассматривалось влияние следующих начальных режимных параметров на скорость распространения пламени и длину открытого факела пылевидного сланца: коэффициента избытка первичного воздуха, температуры и выходной скорости аэросмеси. Можно было ожидать, что воздействие этих параметров отражается и в динамике процессов, происходящих в самом факеле.

На рис. 1 приведены характеристики газообразования и изменения температуры вдоль оси факела. Ход этих кривых типичен для всех проведенных опытов. Процесс горения можно условно разложить на три области. В первой из них в пределах 50—100 мм от устья горелки концентрация газов и температура изменяются незначительно. Согласно схеме периферийного зажигания аэросмеси на этом расстоянии активное горение развивается в тонком пограничном слое, и в дальнейшем распространение пламени в глубь потока обеспечивается теплопроводностью и турбулентным смешением.

По аналогии с теорией турбулентных струй эта область соответствует начальному участку струи и ее можно назвать зоной до воспламенения (на оси). За этой зоной начинается интенсивное убывание концент-

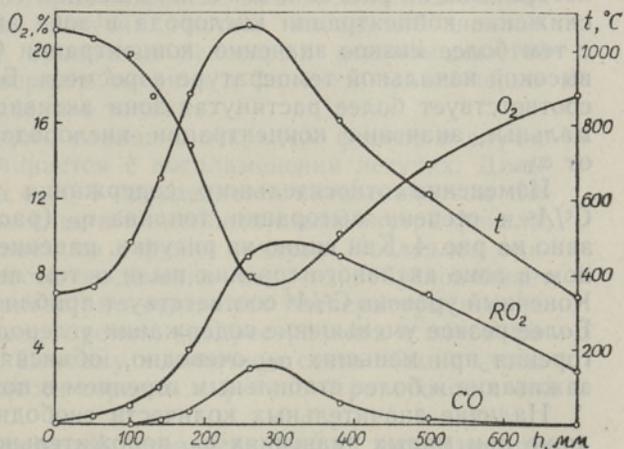
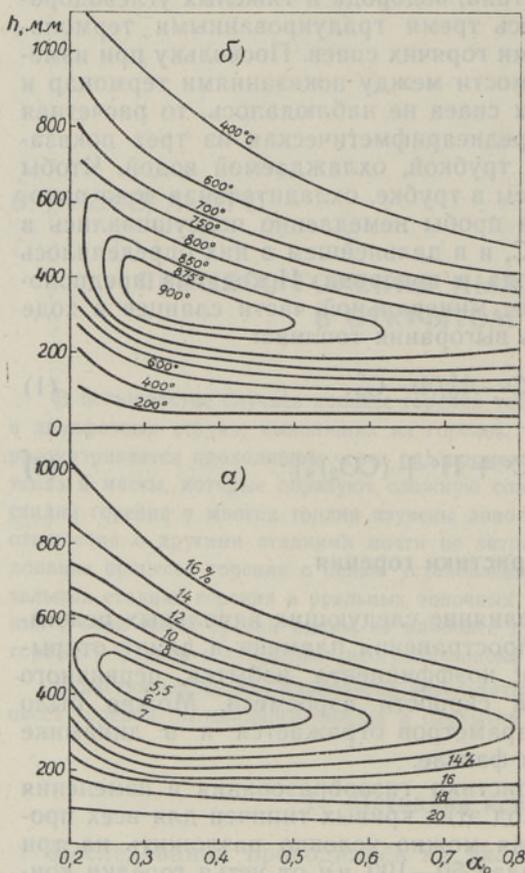


Рис. 1. Изменение концентрации газовых компонентов и температуры вдоль оси факела:  $\alpha_0 = 0,6$ ;  $T_0 = 623^\circ K$ ;  $\omega_{0H} = 3,60$  м/сек.

рации кислорода и повышение температуры до их экстремальных значений (зона активного горения). Это обусловлено все возрастающим



количеством воздуха, подсосываемого струей. Дальше, в зоне догорания, большой избыток кислорода начинает тормозить развитие процесса горения, поскольку с увеличением количества подсосываемого воздуха температура в факеле начинает быстро падать и горение становится малоинтенсивным и менее устойчивым.

На рис. 2а, б изображены кривые изменения температуры и концентрации кислорода на оси факела в зависимости от коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha_0$ . Как видно из рисунка, с уменьшением  $\alpha_0$  протяжение всех рассмотренных зон в факеле увеличивается. Наивысшая температура и наименьшая концентрация кислорода на оси факела отмечаются в области  $\alpha_0 \approx 0,35$ . Это свиде-

Рис. 2. Изменение температуры на оси факела и концентрации кислорода в зависимости от  $\alpha_0$ : а — изменение концентрации кислорода; б — изменение температуры.  $T_0 = 373^\circ \text{K}$ ;  $\omega_{0н} = 2,50 \text{ м/сек}$ .

тельствуем о том, что горение ограничено способностью топлива вступать в реакцию с окислителем в ходе процесса.

Изменение концентрации кислорода вдоль оси факела графически изображено на рис. 3а и 3б. С повышением  $T_0$  происходит более быстрое снижение концентрации кислорода в зоне активного горения. Вместе с тем более низкое значение концентрации  $\text{O}_2$  достигается при более высокой начальной температуре аэросмеси. Большей  $\omega_{0н}$  при  $T_0 = \text{const}$  соответствует более растянутая зона активного горения, причем минимальные значения концентрации кислорода практически не зависят от  $\omega_{0н}$ .

Изменение относительного содержания углерода в пробах пыли  $\text{C}^c/\text{A}^c$  и степени выгорания топлива  $\eta_c$  (рассчитанной по  $\text{C}^c/\text{A}^c$ ) показано на рис. 4. Как видно из рисунка, падение  $\text{C}^c/\text{A}^c$  происходит в основном в зоне активного горения пыли и тем интенсивнее, чем больше  $\alpha_0$ . Конечный уровень  $\text{C}^c/\text{A}^c$  соответствует приблизительно величине  $\eta_c = 0,9$ . Более резкое уменьшение содержания углерода в начале зоны активного горения при меньших  $\alpha_0$ , очевидно, объясняется лучшими условиями зажигания и более стабильным горением в пограничном слое факела.

Наличие значительных количеств свободного кислорода в факеле, даже при малых значениях  $\alpha_0$ , положительное влияние повышения на-

чальной температуры и отрицательное воздействие повышения выходной скорости аэросмеси на интенсификацию горения дают основание предполагать, что и развитие процесса горения пылевидного сланца в открытом факеле определяется главным образом химико-кинетическим фактором.

Учитывая, что выход летучих в условиях горения измельченного натурального топлива заканчивается до начала горения кокса [2, 3], и сопоставляя относительное содержание летучих в пылевидном сланце ( $V_r = 80-90\%$ ) с предельной степенью выгорания по остаточному содержанию углерода в ооксованной пыли топлива, приходим к заключению, что факторами, ограничивающими развитие горения пылевидного сланца в

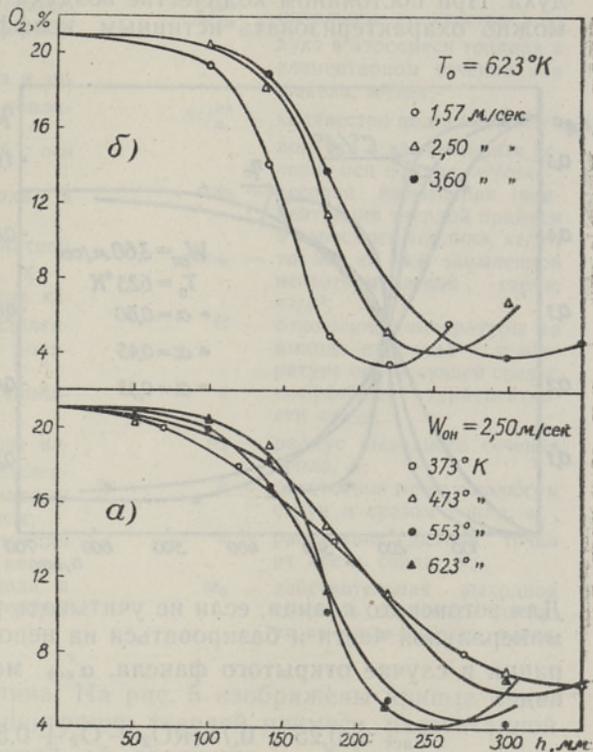


Рис. 3. Изменение концентрации кислорода вдоль оси факела: а — в зависимости от  $T_0$ ; б — в зависимости от  $w_{0n}$ .  $\alpha_0 = 0,45$ .

открытом факеле, являются выделение (включая как процесс термического разложения топлива, так и внутреннюю диффузию его продуктов к поверхности частицы) и горение летучих.

### 3. Горение по оси факела

На основе изложенного можно сделать вывод, что изучение процесса горения пылевидного сланца в открытом факеле в связи с исследованием динамики выделения и горения летучих топлива вполне обосновано. Представляет также интерес сравнение некоторых закономерностей горения пыли натурального твердого топлива в факеле с закономерностями горения факела газообразного топлива.

Развитие горения пылевидного сланца в открытом факеле в случае периферийного зажигания начинается с воспламенения летучих. Дальнейшее развитие процесса при  $\alpha_0 < 1$  определяется интенсивностью выделения летучих в пограничном слое и в смежных слоях внутри факела, а также количеством подсасываемого в факел воздуха. Последнее, оказывая влияние на интенсивность выделения летучих, обуславливает существующий уровень и характер распределения температуры в поперечном сечении факела. Процесс горения, распространяясь в глубь факела, завершается на его оси. Поэтому в конечном счете общий характер и продолжительность процесса горения в факеле отражаются в его развитии по оси.

Одним из важнейших показателей, характеризующих развитие про-

цесса горения, является изменение концентрации кислорода вдоль оси факела в результате одновременного выгорания и подсасывания воздуха. При постоянном количестве воздуха протекание процесса горения можно охарактеризовать истинным коэффициентом избытка воздуха

$\alpha_{\text{ист}}$ , являющимся итоговым в данный момент развития процесса:

$$\alpha_{\text{ист}} = \alpha_0 / y. \quad (3)$$

С другой стороны,  $\alpha_{\text{ист}}$  можно определить из баланса количества воздуха и продуктов сгорания и разложения минеральной части топлива.

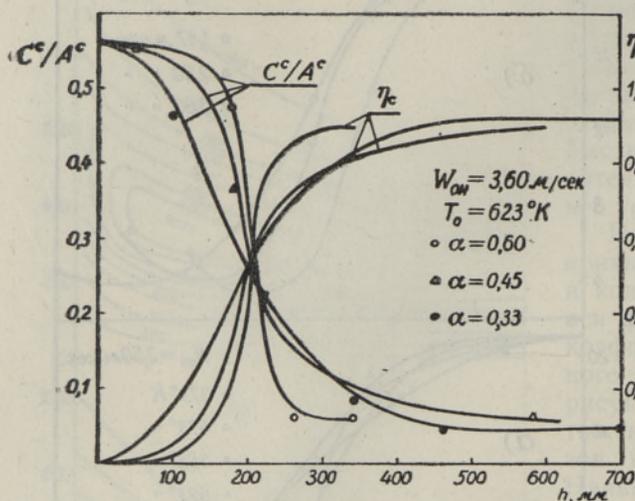


Рис. 4. Изменение относительного содержания углерода в пробах пыли и степени выгорания топлива в зависимости от  $\alpha_0$ .

Для эстонского сланца, если не учитывать разложения карбонатов в его минеральной части и базироваться на неполном анализе продуктов сгорания в случае открытого факела,  $\alpha_{\text{ист}}^r$  можно выразить в следующем виде:

$$\alpha_{\text{ист}}^r = 0,25 + 0,75(\text{RO}_2 + \text{O}_2 + 0,5\text{CO})/(\text{RO}_2 + \text{CO}). \quad (4)$$

Если процесс горения происходит при постоянном количестве воздуха, то величины  $\alpha_{\text{ист}}$  и  $\alpha_{\text{ист}}^r$  должны совпадать. В рассматриваемом случае значение  $\alpha_{\text{ист}}^r$ , рассчитанное по формуле (4), превышает  $\alpha_{\text{ист}}$ , вычисленное по формуле (3), поскольку количество воздуха, принимающее участие в процессе горения, возрастает. Тогда в данной точке на оси факела относительный прирост количества воздуха равен относительному приросту  $\alpha_{\text{ист}}^r$  в этой точке, или

$$Q_{0v}^{\text{эл}}/(Q_{0v}^{\text{эл}} + \Delta Q_{0v}^{\text{эл}}) = \alpha_{\text{ист}}/\alpha_{\text{ист}}^r. \quad (5)$$

Прирост количества воздуха  $\Delta Q_{0v}^{\text{эл}}$  на оси факела является результатом турбулентного перемешивания в горящей запыленной струе. Следовательно, относительный прирост количества воздуха на оси факела по существу аналогичен убыванию концентрации примеси в негорящей струе, или

$$Q_{0v}^{\text{эл}}/(Q_{0v}^{\text{эл}} + \Delta Q_{0v}^{\text{эл}}) = \Delta x_m/\Delta x_0. \quad (6)$$

Для неизотермической запыленной струи изменение осевой избыточной концентрации твердой примеси можно рассчитать по следующей формуле [4]:

$$\Delta x_m/\Delta x_0 = 0,7\sqrt{1 + \kappa_0} \cdot R_0/a \cdot \sqrt{\Theta} \cdot (x + k). \quad (7)$$

Полагая в первом приближении  $\eta_c \approx y$ , можно на основе соотношений (5) и (6) сопоставить неизотермическую запыленную струю с горя-

## Обозначения

$\eta_c$ — степень выгорания топлива по остаточному содержанию углерода;	$Q_{0в}^{эл}$ — начальное количество воздуха в аэромеси топлива в элементарном сечении оси факела, $м^3/сек$ ;
$C_0^c$ и $A_0^c$ — содержание углерода и золы в сухой массе топлива, %;	$\Delta Q_{в}^{эл}$ — количество подсосываемого воздуха в элементарное сечение оси факела, $м^3/сек$ ;
$C^c$ и $A^c$ — то же в пробе, взятой с оси факела, %;	$\Delta \chi_0$ — весовая избыточная концентрация твердой примеси в аэромеси топлива, $кг/м^3$ ;
$H^c$ — содержание водорода в пробе, %;	$\Delta \chi_m$ — то же на оси запыленной неизотермической струи, $кг/м^3$ ;
$(CO_2)_k^c$ — содержание карбонатной углекислоты в пробе, %;	$\Theta$ — отношение температуры на выходе из сопла к температуре окружающей среды;
$\alpha_{ист}$ — истинный коэффициент избытка воздуха, определенный по постоянному количеству воздуха;	$a$ — коэффициент турбулентности струи;
$y$ — степень выгорания топлива;	$R_0$ — радиус выходного сечения сопла, $м$ ;
$\alpha_{ист}^r$ — истинный коэффициент избытка воздуха, определенный по действительному составу газов в факеле;	$k$ — расстояние между полюсом струи и срезом сопла, $м$ ;
$RO_2, O_2, CO$ — объемные концентрации трехатомных газов, кислорода и окиси углерода в сухих продуктах сгорания, %;	$x$ — расстояние данной точки от среза сопла, $м$ ;
	$\omega_0$ — действительная выходная скорость аэромеси топлива из сопла горелки, $м/сек$ .

щей струей пылевидного топлива. На рис. 5 изображены кривые изменения избыточной осевой концентрации твердой примеси, рассчитанной по формуле (7), и эквивалентной ей величины  $\alpha_{ист}^r/\alpha_{ист}$  в горящей струе пылевидного сланца. Из рисунка следует, что приращение количества воздуха на оси в горящей струе происходит медленнее, чем в неизотермической запыленной струе. Опытами установлено, что эта

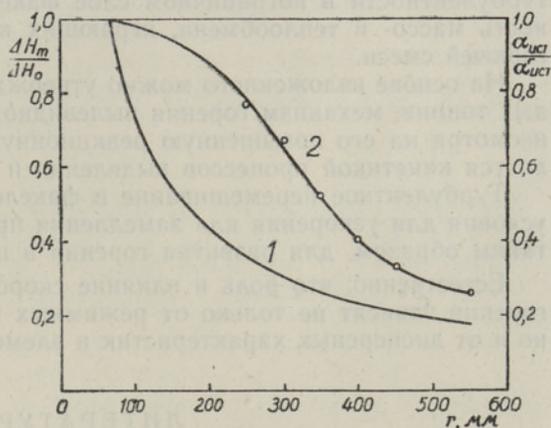


Рис. 5. Изменение избыточной осевой концентрации твердой примеси в запыленной неизотермической струе и величины  $\alpha_{ист}^r/\alpha_{ист}$  в горящей струе пылевидного сланца:

- 1 —  $\Delta \chi_m/\Delta \chi_0$ ;  
 2 —  $\alpha_{ист}^r/\alpha_{ист}$ ,  $\alpha_0 = 0,45$ ;  
 $T_0 = 623^\circ K$ ;  
 $\omega_{0н} = 3,60 м/сек$ .

тенденция проявляется отчетливее при более высоких значениях коэффициента избытка первичного воздуха. При более низких значениях  $\alpha_0$  и  $\omega_0$  эти кривые сближаются. В этом, очевидно, заключаются некоторые особенности горения в открытом факеле пылевидных натуральных топлив, богатых летучими. Если исходить из предположения, что принцип диффузионного горения будет соблюден без значительного откло-

нения, то можно ожидать, что изменение  $Q_{об}^{эл}/(Q_{об}^{эл} + \Delta Q_{в}^{эл})$  должно приблизительно соответствовать изменению в неизотермической запыленной струе. В противном случае будет нарушен предполагаемый механизм горения, что показал и анализ проведенных опытов.

Действительно, при горении пылевидного сланца горючая смесь, способная к воспламенению, образуется в самом ходе процесса горения при выделении летучих. Таким образом, в результате выделения летучих в пограничном слое факела увеличивается объем газовой среды, участвующей в реакции горения. Если летучие немедленно вступают в реакцию с воздухом, то, учитывая небольшое различие объемов горючей смеси летучих и их продуктов сгорания, статика и кинетика процесса горения не должны значительно сказываться на ходе кривых  $Q_{об}^{эл}/(Q_{об}^{эл} + \Delta Q_{в}^{эл})$ .

При благоприятных температурных условиях в факеле пылевидного сланца может создаться такое положение, когда вследствие интенсивного выделения летучих часть их не успевает мгновенно вступить в реакцию из-за недостатка окислителя в зоне горения, обусловленного отставанием в турбулентном перемешивании. В этом случае завершение процесса горения в пограничном слое струи переносится дальше от сопла горелки и, следовательно, уменьшается интенсивность проникновения воздуха к оси факела. Быстрому выделению летучих в факеле пылевидного сланца способствуют более интенсивное тепловыделение в единичном объеме зоны горения и перенос этого тепла в зону подготовки аэросмеси к воспламенению. На вероятность существования такого положения в открытом факеле пылевидного сланца указывает обработка опытных данных. С увеличением коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha_0$  интенсифицируются тепловыделение в зоне горения и выделение летучих в смежной с ней зоне. Уменьшение выходной скорости аэросмеси  $\omega_0$  ведет к увеличению доли свободного кислорода, подсасываемого к факелу, вследствие замедления процесса выгорания в пограничном слое. Вероятно, что с уменьшением  $\omega_0$  также изменяются и характеристики турбулентности в пограничном слое факела, определяющие интенсивность массо- и теплообмена, играющих важную роль при подготовке горючей смеси.

На основе изложенного можно утверждать, что, как и для всех твердых топлив, механизм горения пылевидного сланца в открытом факеле, несмотря на его повышенную реакционную способность, также определяется кинетикой процессов выделения и горения летучих.

Турбулентное перемешивание в факеле и факела со средой создает условия для ускорения или замедления предыдущих стадий процесса и, таким образом, для развития горения в целом.

Естественно, что роль и влияние скорости выделения летучих и их горения зависят не только от режимных параметров процесса горения, но и от дисперсных характеристик и элементарного состава топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Отс А. А., Пресс В. В., Ууэсоо Р. Н., Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Серия А, № 255, 3 (1967).
2. Essenhigh R. H., Trans. of ASME, Ser. A, No. 3, 24 (1963). (Русский перевод).
3. Иванова И. П., Бабий В. И., Теплоэнергетика, № 4, 54 (1966).
4. Абрамович Г. Н., Прикладная газовая динамика, М., Гостехиздат, 1951.

V. PRESS, A. OTS

## TOLMPÕLEVKIVI PÕLEMISPROTSESS LAHTISE LEEGIS

Artiklis vaadeldakse kütuse aeroosegu primaarse liigõhuteguri, algtemperatuuri ja kiiruse mõju tolmpõlevkivi põlemisprotsessile lahtises telgsümmeetrilises leegis. Lähtudes gaasiliste põlemisproduktide kontsentratsioonist ja kütuseosakeste põlemisastmest, esitatakse turbulents segunemise ja põlemise tulemusena meetod õhuhulga suhtelise muutumise arvestamiseks leegi teljel. Selgitatakse välja, et tolmpõlevkivi põletamisel on õhuhulga juurdekasvul lahtise leegi teljele aeglasem tendents kui tolmustatud joale, ning näidatakse selle tendentsi sõltuvus põlemisprotsessi režiimsetest algparameetritest.

V. PRESS, A. OTS

## THE PROCESS OF THE COMBUSTION OF PULVERIZED OIL SHALE IN AN OPEN FLAME

In the paper the influence of the primary air rate, initial temperature and flow speed of the air mixture upon the process of the combustion of pulverized oil shale in an open axisymmetric flame is considered. A method is presented for the calculation of the relative change of the air quantity on the axis of flame due to turbulent mixing and burning, proceeding from the concentration of gaseous combustion products and the burning rate of fuel particles. A tendency towards a slower increase in the air quantity on the axis of the open flame is established in comparison with the dust jet, and the dependence of that tendency on the initial regime parameters of the combustion of pulverized oil shale is pointed out.