

<https://doi.org/10.3176/phys.math.1968.1.13>

Э. ЮРИСМА

О МЕХАНИЗМЕ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

При применении метода кипящего слоя, а также изучении процессов, происходящих в нем, необходимо уметь определять механизм кипящего слоя. В настоящей статье на основе опытных данных, полученных в ходе испытаний крупных фракций ($d_{\text{мин}} \geq 1$ мм), дается метод определения нижней предельной скорости кипящего слоя и приводятся формулы расчета предельной скорости, состояния, высоты и пористости кипящего слоя.

Описание опытной установки и используемый материал. Опыты проводились на лабораторной установке, которая схематически изображена на рис. 1. Опытная установка состоит из: воздушной коробки; решетки, герметически прикрепленной к коробке; кварцевой шахты круглого сечения и воздухопроводов. Живое сечение решетки равно 3,7%.

Стенка шахты не оказывает заметного влияния на аэродинамику кипящего слоя, если выполнено условие $\frac{D}{d} \geq 15$. Поскольку диаметр шахты $D = 76,3$ мм, то максимальный с точки зрения аэродинамики диаметр частицы $d \leq 5$ мм.

Опыты проводились с четырьмя фракциями сланца: $F_{1/4}$, $F_{1/3}$, $F_{1/2}$, $F_{2/1,2}$, которые по размерам совпадают с применяемыми на практике фракциями при энергетическом или технологическом использовании сланцев.

Методика испытаний. Порядок проведения опытов следующий: в шахту опытной установки подают определенное количество исследуемой фракции. Затем слой выравнивают по горизонтали и измеряют его высоту. После этого слой продувается воздухом, постепенно небольшими количествами увеличивая расход воздуха до интенсивного «кипения» слоя. При этом после каждого увеличения расхода воздуха измерялись высота слоя, расход воздуха, давление и температура воздуха под решеткой. По окончании опыта оставшийся в шахте материал взвешивали.

Определение нижней предельной скорости кипящего слоя. Нижней предельной скоростью кипящего слоя называется скорость воздуха в свободном сечении шахты, при которой неподвижный слой переходит в кипящий.

Для однозначного определения нижней предельной скорости еще нет надежного метода, в связи с чем при испытании одного и того же материала получаются весьма различные результаты.

Для получения более точных результатов предельная скорость была определена условно. Для этого опытные данные обрабатывались двумя методами:

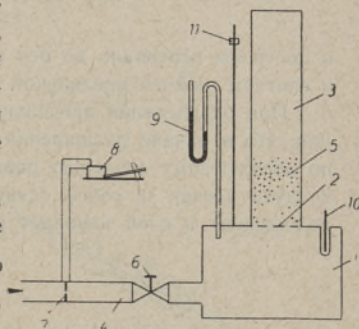


Рис. 1. Схема опытной установки кипящего слоя:

1 — коробка воздуха; 2 — решетка; 3 — шахта; 4 — трубопровод воздуха; 5 — кипящий слой; 6 — вентиль для регулирования воздуха; 7 — измерительная диафрагма; 8 — микроманометр; 9 — U-образный манометр; 10 — термометр; 11 — установка для измерения высоты кипящего слоя.

- 1) определение предельной скорости по аэродинамическому сопротивлению слоя;
- 2) определение предельной скорости по расширению слоя.

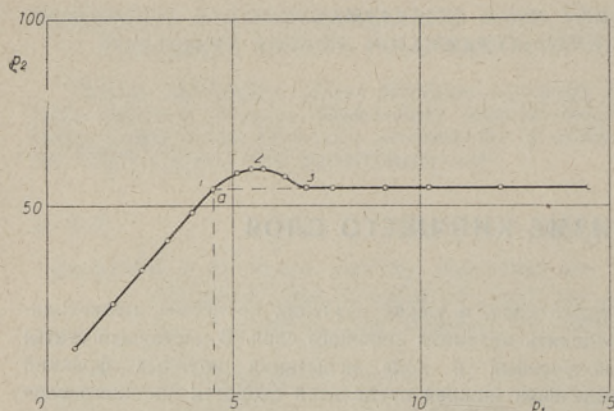


Рис. 2. Определение предельной скорости кипящего слоя по характеристике аэродинамического сопротивления.

При применении первого метода необходимо измерять сопротивление слоя и расход проходящего через слой воздуха. Результаты опытов показаны на рис. 2, где по оси абсцисс нанесены перепады давления в измерительной диафрагме расхода воздуха, p_1 в мм в. ст. и по оси ординат — аэродинамическое сопротивление слоя p_2 в мм в. ст.

Для нахождения нижней предельной скорости удлиняем линию аэродинамического сопротивления кипящего слоя (см. рис. 2, пунктир) до пересечения с линией аэродинамического сопротивления стоящего слоя. Из точки пересечения

a построим вертикаль до оси абсцисс. Скорость, соответствующую точке пересечения, и считаем нижней предельной скоростью.

При определении предельной скорости по расширению слоя исходим из соображения, что в начале расширения слоя сила давления воздуха, приложенная к частицам, по абсолютному значению равняется весу частиц. Незначительное повышение расхода воздуха влечет за собой сдвиг в слое (отдельные частицы изменяют взаимное расположение) и слой начинает расширяться. Увеличивается высота слоя.

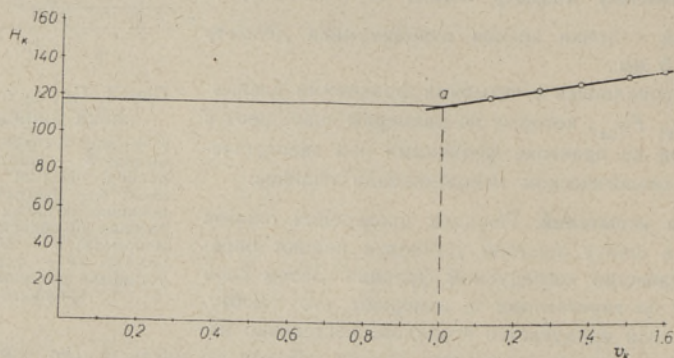


Рис. 3. Определение предельной скорости кипящего слоя по расширению кипящего слоя.

Далее измеряются расход проходящего слой воздуха и высота слоя. Зависимость между скоростью воздуха и высотой слоя показана на рис. 3. Для определения граничной скорости поступаем следующим образом: из точки пересечения a линии начальной высоты слоя и линии расширения слоя строим вертикальную линию до пересечения ее с осью абсцисс. Точка пересечения на оси абсцисс определяет значение нижней граничной скорости.

Описанными методами были проработаны данные 30 опытов. Сопоставление результатов обоих методов дает хорошее их совпадение. Отсюда вытекает, что оба метода с равным успехом могут применяться для определения предельной скорости.

Обобщение опытных данных. Результаты, полученные описанными выше методами, выражаются в критериальном виде соотношением

$$Re = c Fe^n. \quad (1)$$

Нанеся логарифмы критериев Re и Fe на координатные оси, видим, что полученные точки находятся на одной прямой. Вычислив значения коэффициента c и показателя степени n , можно данные опытов выразить соотношением

$$Re = 0,025 Fe^{1,88},$$

где — $Re = \frac{v_0 d_e}{\nu}$ — критерий Рейнольдса и $Fe = d_e \sqrt[3]{\frac{4}{3} \frac{g}{\nu^2} (Y_0 - 1)}$ — критерий Федорова.

На основе известных физических параметров можно по формуле (1) легко вычислить нижнюю предельную скорость кипящего слоя.

Уравнение состояния кипящего слоя. Для вывода уравнения состояния вычислили относительный прирост высоты слоя ΔH по отношению скоростей воздуха $\frac{v_0}{v_k}$ при разных его скоростях

Результаты расчета нанесены на рис. 4. На оси абсцисс нанесены значения отношения скоростей воздуха $\frac{v_0}{v_k}$, на оси ординат — относительный прирост высоты слоя ΔH . По рис. 4 видно, что показанное семейство точек достаточно точно характеризуется прямой линией. Уравнение прямой выражается в следующем виде:

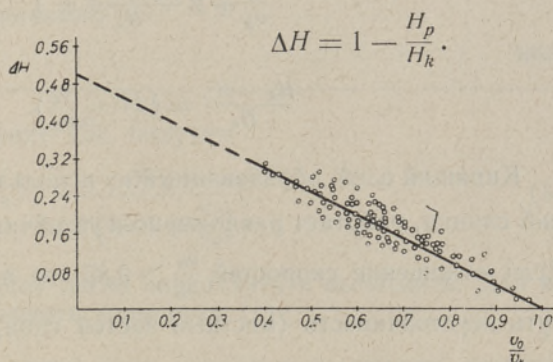


Рис. 4. Зависимость относительного прироста высоты кипящего слоя от отношения скоростей.

$$\frac{v_0}{v_{ka}} + \frac{H_k - H_p}{H_k b} = 1, \quad (2)$$

где a и b — соответствующие отрезки абсциссы и ординаты.

Обозначим точки пересечения прямой линия осями P_x и P_y . Координаты точки пересечения $P_x(1/0)$ *. В этом случае

$$\frac{H_k - H_p}{H_k} = 0,$$

$$H_k = H_p, \text{ а также } \frac{v_0}{v_k} = 1 = a.$$

Высота кипящего слоя H_k равняется высоте насыпного слоя H_p в момент перехода насыпного слоя в кипящий. Скорость воздуха тогда $v_k = v_0$.

* Более точные значения P_x и P_y можно получить методом регрессивного анализа.

Координаты точки пересечения прямой $P_y(0/0,5)$.

Подставив эти значения в уравнение (2), получим:

$$\frac{v_0}{v_k} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{H_k - H_p}{0,5H_k} = 1.$$

Отношение скоростей $\frac{v_0}{v_k} = 0$ только в случае, когда $v_0 = 0$ или v_k очень велика по сравнению с v_0 . Случай $v_0 = 0$ в данной интерпретации не имеет физического смысла, поэтому принимаем во внимание случай $v_k \gg v_0$.

Начиная с того момента, когда скорость воздуха v_k будет равна скорости витания частицы v_h , относительный прирост высоты слоя будет равен 1, т. е. частицы увлекаются потоком воздуха.

$$\frac{H_k - H_p}{H_k} = 1 \quad \text{и} \quad H_k \gg H_p,$$

т. е. высота насыпного слоя достаточно мала по сравнению с высотой кипящего слоя.

Подставляя значения a и b в уравнение (2), получим:

$$\frac{v_0}{v_k} + 2 \frac{H_k - H_p}{H_k} = 1 \quad (2a)$$

или

$$\frac{H_k - H_p}{H_k} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_0}{v_k} \right). \quad (2a')$$

Кипящий слой, образованный из использованных в ходе опытов фракций сланца, работает равномерно и устойчиво в пределах $0,58 \leq \frac{v_0}{v_k} \leq 0,85$. Если отношение скоростей $\frac{v_0}{v_k} > 0,85$, то в работе слоя может возникнуть неустойчивость (местный застой слоя). При $\frac{v_0}{v_k} < 0,58$ начинаются сильное волнение и пульсация слоя. При дальнейшем уменьшении $\frac{v_0}{v_k}$ слой полностью теряет устойчивость и, начиная с $\frac{v_0}{v_k} \sim 0,2$, наблюдается сильное увлечение частиц воздухом.

Уравнение (2a') полностью описывает состояние кипящего слоя, поэтому его можно назвать уравнением состояния кипящего слоя.

Высота кипящего слоя. Выражая H_k из уравнения (2a'), получим для расчета высоты кипящего слоя следующее уравнение:

$$H_k = \frac{H_p}{\left(0,5 + 0,5 \frac{v_0}{v_k} \right)}. \quad (3)$$

Высота насыпного слоя, выраженная по весу, насыпному весу материала и по сечению шахты,

$$H_p = \frac{G_p}{\gamma_p F}. \quad (4)$$

Обозначения

D — диаметр шахты;	Re — критерий Рейнольдса;
d — диаметр твердых частиц;	v_0 — средняя скорость воздуха в свободном сечении установки, необходимая для начала кипящего слоя;
d_e — диаметр эквивалентного частице шарика;	v_k — скорость витания частицы;
F — поперечное сечение шахты;	v_k — средняя скорость воздуха в свободном сечении установки при высоте кипящего слоя H_k ;
Fe — критерий Федорова;	γ_0 — кажущийся удельный вес частицы;
G_p — вес насыпного слоя;	γ_k — удельный вес воздуха;
H_p — высота насыпного слоя;	γ_p — насыпной вес материала;
H_k — высота кипящего слоя;	γ_n — кажущийся удельный вес материала;
H_n — кажущаяся высота слоя без учета пор;	ν — кинематический коэффициент вязкости.
ΔH — относительный прирост высоты кипящего слоя;	
m_k — средняя пористость кипящего слоя;	
p_1 — перепад давления в измерительной диафрагме расхода воздуха;	
p_2 — аэродинамическое сопротивление слоя;	

Подставляя H_p в уравнение (3), получим

$$H_k = \frac{G_p}{\gamma_p F \left(0,5 + 0,5 \frac{v_0}{v_k} \right)}. \quad (3a)$$

Величины в уравнении (3a) легко определить и вычислить. Для вычисления v_0 следует использовать уравнение (1).

Средняя пористость кипящего слоя. Среднюю пористость кипящего слоя можно выразить уравнением

$$m_k = \frac{H_k - H_n}{H_k} = 1 - \frac{H_n}{H_k}. \quad (5)$$

Кажущуюся высоту слоя вычислим следующим образом:

$$H_n = \frac{G_p}{\gamma_n F}.$$

Подставляя выражения для H_n и H_k в формулу (5), получим формулу для расчета пористости кипящего слоя:

$$m_k = 1 - \frac{\gamma_p \left(0,5 + 0,5 \frac{v_0}{v_k} \right)}{\gamma_n}. \quad (5a)$$

Как видно, предлагаемые формулы просты и легко применимы для расчета кипящего слоя.

E. JURISMA

KEEVKIHI MEHCHANISMIST

Laboratoorsel katseseadmel (joon. 1) uuriti põlevkivifraktsioonidest ($1,2 \div 5$ mm) moodustunud keevkihi mehhanismi. Katseandmete põhjal määrati graafiliselt (joon. 2 ja 3) keevkihi alumine piirkiirus, mida saab arvutada valemiga (1).

Sõltuvalt keevkihi kõrguste suhtelisest juurdekasvust ja kiiruste suhtest (joon. 4) avaldatakse seos (2a'), mis iseloomustab hästi keevkihi olekut.

Keevkiht töötab stabiilselt, kui $0,58 \leq \frac{v_0}{v_k} \leq 0,85$.

Keevkihi kõrguse saab arvutada valemiga (3) ja keskmise poorsuse valemiga (5a).

E. JURISMA

ON THE MECHANISM OF A FLUIDIZED BED

The mechanism of a fluidized bed resulting from oil-shale fractions ($1,2 \div 5$ mm) was studied by means of an experimental plant. According to test data, minimum-fluidization velocity was determined graphically (figs 2 and 3) and expressed by formula (1).

Relation (2a') is given, characterizing the state of the fluidized bed and depending on the relative increase of the height of the fluidized bed and on the ratio of velocities. The fluidized bed is stable when $0,58 \leq \frac{v_0}{v_k} \leq 0,85$.

The height of the fluidized bed can be expressed by formula (3) and its average porosity — by formula (5a).