

Для фракций (100–200 °С) показаны несколько большие отклонения рассчитанных значений физико-химических свойств от измеренных экспериментально, что объясняется повышенным присутствием аренов. Однако она не превышает 3 %.

Таким образом, предложенный подход к моделированию технологических свойств и модели регрессионной неаддитивности и "квазиаддитивности", соответствующие представлениям об образовании промежуточных сольватов и ассоциатов УВ, с высокой точностью описывают большой массив экспериментальных данных для нефтяных систем, в том числе, и существенно неаддитивных свойств нефтяных систем, прежде всего вязкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крестов Г. А. Физико-химические свойства бинарных растворителей. /Справ. изд. — Л.: Химия, 1988. — 688 с.
2. Шапаронов М. И. Введение в современную теорию растворов. — М.: ВШ. — 1976. — 296 с.
3. Куликова И. А., Сваровская Н. А. и др. Оценка энтальпийных характеристик нефтяных систем по данным калориметрических исследований. /Препринт № 6 ТФ СО АН СССР. — Томск: СО АН СССР. — 1991. — 44 с.
4. Сваровская Н. А., Марасанова И. В. и др. Физико-химические основы прогнозирования неаддитивности свойств нефтяных систем. /Сб. научн. тр. по межд. НТК "Нефтегазовые ресурсы" — М.: ГАНГ. — 1994. — С. 181–185.
5. Kravtsov A. V., Svarovskaya N. A., Marasanova I. V. Studies on the Behavior of Liquid hydrocarbon. // React. Kinet. Cotel. Lett. — 1995. — Vol. 55. — N. 1. — P. 59–67.
6. Сваровская Н. А., Марасанова И. В., Яблонский Г.С. Учёт физико-химических закономерностей при моделировании свойств лёгких нефтяных систем. — Томск: ТПУ. — 1997. — 48 с.

УДК 66.01

ИССЛЕДОВАНИЯ БАТАРЕЙНОГО СЕПАРАТОРА С ЦИКЛОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ОТ ПРИМЕСИ

М.В. ВАСИЛЕВСКИЙ, А.Т. РОСЛЯК, Е.Г. ЗЫКОВ

В работе представлены результаты обследования промышленного сепаратора природного газа, установлены причины снижения эффективности пылеулавливания, проведены модельные испытания и определены возможные варианты повышения эффективности батарейных сепараторов.

Опыт эксплуатации крупнейшего в мире производства метанола из природного газа на Томском нефтехимическом комбинате выявил в первые годы важную проблему, связанную с преждевременным выходом из строя дорогостоящих компрессорных установок. Обследования, проведенные авторами статьи и работниками комбината, установили, что в поступающем из магистрального газопровода природном газе имеются твердые включения. Специально проведенные исследования по улавливанию из газопровода твердых примесей и их анализу показали, что твердые включения представляют собой частицы с размерами 1–5 мкм, которые активно агломерируют, в осадке — частицы 15–100 мкм. По результатам рентгеноструктурного анализа твердые включения являются частицами кварца, кремния и окислов железа ($\rho_n = 2,4 \text{ г/см}^3$).

На входе в компрессор в соответствии с проектной технологической схемой установлен сепаратор для очистки газа от жидких углеводородных частиц. Он состоит из трех расположенных одна над другой секций: секция сбора примеси, секция ввода газа и распределения его по сепарирующим элементам, секция сбора и вывода очищенного газа. Сепарационные элементы (рис. 1) представляют собой циклончики с корпусом диаметром 57, высотой 190 мм, имеют выводной патрубок диаметром 35 мм и закручиватель, состоящий из трех лопастей, имеющих загиб от осевого направления на четверть оборота. Выводной патрубок во входной части имеет конфузор, так что зазор между корпусом и кромкой составляет 4,5 мм. Угол наклона на выходе из закручивателя $\beta = 50^\circ$. Все лопатки циклончиков имеют одинаковое направление закрутки — по часовой стрелке. Конусная часть корпуса имеет высоту 40 мм, диаметр разгрузочного отверстия — 25 мм. Циклонные элементы расположены в корпусе сепаратора на окружностях в следующих количествах (r — радиус, n — количество элементов) (см. таблицу 1).

Таблица 1

$2r$	1240	1110	980	850	720	590	460	330
n	52	45	40	36	30	23	18	11

В секторе со стороны входа газового потока элементы отсутствуют. Периферийные циклончики расположены выше остальных приблизительно на высоту корпуса циклончика.

Газ поступает в распределительную камеру, проходит через циклончики и через центральные трубки очищенным выходит в сборную камеру.

В условиях поступления жидких частиц входное пространство образует первую ступень очистки. Частицы в распределительной камере взаимодействуют с выходными трубками циклончиков, осаждаются на них и стекают в циклончики. Неотсепарированные частицы проходят стадию выделения в самих циклончиках.

При этом в условиях образования подвижных пленок жидкости в сепарационных элементах они находятся в состоянии одинакового гидродинамического режима.

При вскрытии сепаратора обнаружилось, что на дне имеется слой спрессованной пыли с плоской поверхностью за исключением донного отверстия и отсутствием пыли в участке, соответствующем вводу газа в сепаратор. Уровень пыли составлял 2/3 высоты сферического днища, причем по периферии, на расстоянии 1/3 от сопряжения с цилиндрической частью, пыль отсутствовала.

Такое состояние пылевого слоя показывает, что, начиная с некоторого момента, возникли сильные перетоки газа, причем эти перетоки носили струйный характер с направлением потоков от периферии в радиальном направлении и вверх в основной массив циклончиков, расположенных ниже периферийных.

Обследование циклонной насадки показало, что периферийные циклончики ($n = 52$) оказались в рабочем состоянии, т.е. чистыми, остальные, за исключением 6 элементов, оказались забитыми в части закручивателя. Три циклончика оказались забитыми полностью. Очевидно, что через периферийные циклончики и эти 6 элементов поток проходил с большой скоростью, так, что произошло истирание элементов. Причем в области сужения могло проходить накопление частиц и разделение потока на две ветви вверх и вниз с увеличением крутизны потока. Интенсивное истирание элементов происходит в области сопряжения конической и цилиндрической части, причем все периферийные циклончики, а также 15 элементов, расположенных в переднем фронте со стороны входа газового потока, имели сквозные щели и канавки в этой области. Большое количество отложений имелось во входной камере на нижерасположенных элементах. Это могло произойти в условиях залпового поступления пыли, когда выходящие трубки задерживали пыль и она осаждалась сгустками, которые не могли пройти через циклончики. С внешней стороны выходных трубок абразивного износа нет. Нет износа и внутри трубок. Это говорит о том, что периферийные циклончики сепарировали пыль с достаточно высокой эффективностью, при этом большая часть газа проходила вместе с пылью через разгрузочные отверстия и в пылесборном пространстве перетекала в циклончики, расположенные на меньших радиусах. Причина забивки циклончиков – неравномерность поступления пыли, т.е. концентрации, а также большая неравномерность по крупности, так что поток разгружается по

ходу движения. При этом циклончики переднего фронта находятся под большим перепадом, чем остальные и они в меньшей степени засорены, с другой стороны периферийные циклончики оказываются в меньшей степени загружены пылью.

Износ внутренних трубок засоренных циклончиков незаметен, что свидетельствует о слабой закрутке потока или даже ее отсутствии. Последнее обстоятельство заставляет полагать, что вихри, поступающие в пылесборную камеру, взаимокompенсируются, выделение частиц из потока затруднено из-за турбулизации и образования поперечных токов газа.

Был проведен анализ пыли, вынесенной из сепаратора. Частицы покрыты мазутно-битумной пленкой, плохо смачивались водой, седиментируются в воде частично. Такие частицы плохо рикошетируют и обладают повышенными абразивными свойствами.

Для выяснения сепарирующей способности газоочистителя были проведены исследования модели сепаратора и его элемента. Геометрические соотношения корпуса модели соответствовали соотношениям промышленного сепаратора (масштаб 1:10). Однако элементы были выполнены в масштабе 1:2,1 и соответственно их количество оказалось

равным $\frac{\sum n \cdot M_2^2}{M_1^2} = \frac{\sum n \cdot 2.1^2}{10^2} \approx 11$, где M_1 и M_2 – величины, обратные масштабам. Такой выбор обуславливается сле

дующими причинами. Уменьшение диаметра циклончиков до 5 мм вызывает масштабные эффекты, которые искажают данные о процессе сепарации. В этом случае течение неавтомоделно, размеры частиц пыли составляют заметные

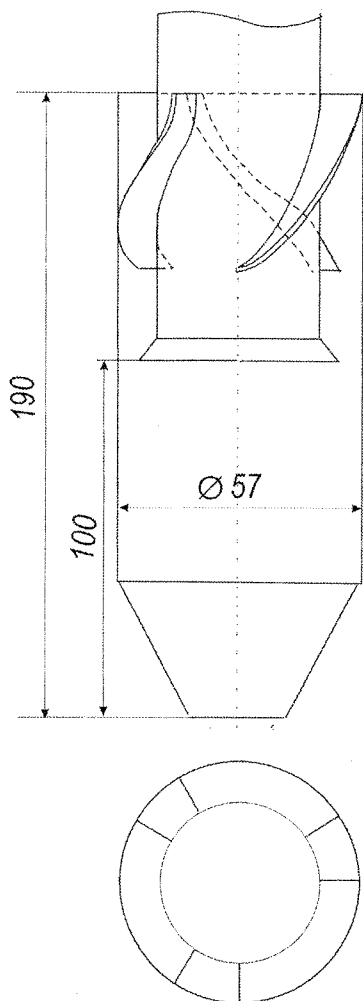


Рис. 1

доли процента от размеров циклончика, преобладают силы адгезии. Необходимо, чтобы элемент работал в модели так, как и в натуре, т.е. порядок интенсивности разделения был одним и тем же [1]. Для каждого циклончика гидродинамика ниже пылевыводного отверстия определяется суммарными потоками моментов импульсов и полных импульсов от всех циклончиков, что в модели также выполняется.

На рис. 2 представлены схемы модели сепаратора и устройства для испытания элемента.

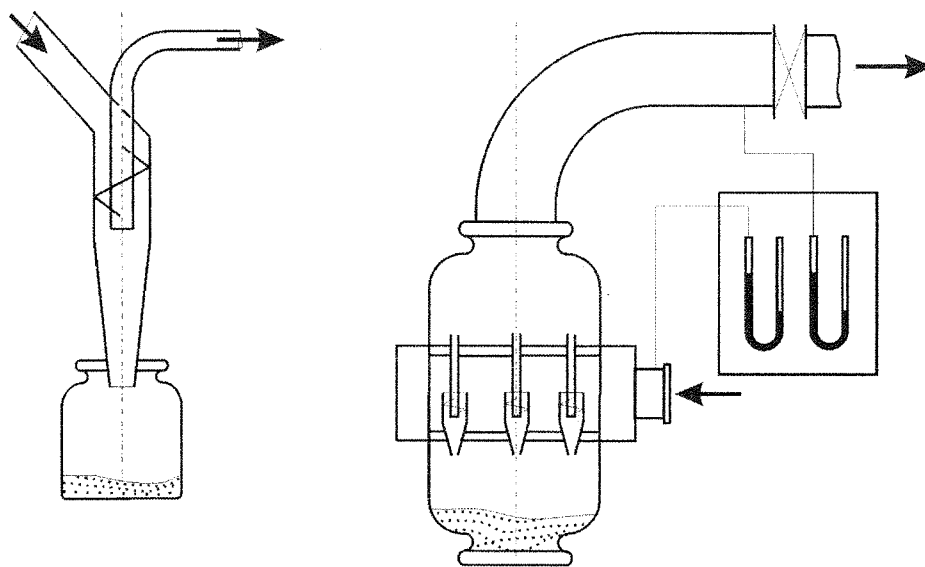


Рис. 2

Корпус модели выполнен прозрачным, что позволило проводить наблюдения за поведением потоков в камере сбора пыли и в камере сбора очищенного газа. Приемник пыли в устройстве для испытания индивидуального циклончика также прозрачен. Для цементной пыли с $\sigma_\delta = 3.1$ и $\delta M = 21$ мкм (дисперсия и медианный размер) эффективность осаждения элемента составляла 88–92%, причем в приемнике наблюдалась интенсивная циркуляция пыли в меридиональных плоскостях. Элемент, в котором отсутствует конфузор, обладает меньшей эффективностью осаждения (75–79%) и тоже дает хотя и слабые, но видимые циркуляции в приемнике.

По аналогии с [2] оценим величину $\delta_\eta = 50$ (размер частиц, масса которых в уносе составляет 50%), и величину $\lg \sigma_\eta$ – стандартное отклонение величины $\lg \delta$ в распределении $\eta_\varphi(\delta)$ – фракционной эффективности сепарации частиц [3].

Причем $\eta_\varphi(\delta) = \Phi(\xi)$ – интеграл вероятности нормального распределения величины x , $x = \lg(\delta/\delta_{\eta=50})/\lg \sigma_\eta$.

Общая эффективность $\eta_0 = \Phi(x_0)$; $x_0 = \frac{\lg \delta_M / \delta_{\eta=50}}{(\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\delta)^{0.5}}$ [3].

Учитывая, что тангенциальная скорость потока после закручивателя равна $w_{\text{вх}} \cdot \text{tg} \beta$, а плановая скорость $w_0 = w_{\text{вх}} \cdot (1 - \bar{r}_0^2)$; $\bar{r}_0 = r_0/R$ – отношение радиусов выводной трубки и корпуса, получим:

$$\delta_{\eta=50} = \frac{3 \cdot \bar{r}_0^\psi}{\text{tg} \beta} \left[\frac{(1 - \bar{r}_0^2) \cdot v \cdot R \cdot \rho}{w_{\text{вх}} \cdot 2 \cdot \bar{h} \cdot \rho_\delta} \right]^{0.5}; \quad (1)$$

$$\sigma_\eta = \left[\frac{4 \cdot \bar{r}_0^{1-\psi} \cdot \bar{h} \cdot \text{tg} \beta}{1 - \bar{r}_0^2} \right]^{0.25}. \quad (2)$$

В этих формулах v – коэффициент кинематической вязкости, ρ , ρ_δ – плотности газа и частиц, $w_{\text{вх}}$ – скорость газа во входном сечении кольцевого канала, $\bar{h} = h/2R$ – расстояние от входного сечения газоотводной трубки до пылевыводного отверстия, ψ – показатель степени в уравнении распределения вращательных скоростей по радиусу.

Для условий эксперимента примем следующие значения:

$$\left(\frac{v}{w_{\text{вх}}} \cdot \frac{\rho}{\rho_\delta} \cdot \frac{R}{2 \cdot \bar{h}} \right)^{0.5} = \left(\frac{1.5 \cdot 10^{-5}}{5} \cdot \frac{1.2}{2400} \cdot \frac{0.0125}{2 \cdot 2} \right)^{0.5} = 2.16 \cdot 10^{-6} (\text{м}).$$

Для элемента, подобного рабочему, $\bar{r}_0 \approx 0.6$, $\beta \approx 40^\circ$, учитывая не полную закрутку потока лопатками (просвет, не перекрываемый лопатками составляет 30%) $\operatorname{tg} \beta = 0.84$. Расчет показывает, что для этих условий $\delta_{\eta=50} = 4.75 \cdot 10^{-6}$ м; $\sigma_\eta = 1.68$; $x_0 = 1.18$; $\eta_0 = 0.88$. Поскольку элемент при индивидуальном испытании оказался не достаточно эффективным, был испытан циклончик с $\bar{r}_0 = 0.45$ и двухзаходным винтовым закручивателем с $\operatorname{tg} \beta = 3.1$. Он формировал короткий факел, не создавал видимых поперечных (меридиональных) циркуляций в приемнике. Распределение пыли оказалось равномерным по периферии приемника и небольшим "холмом" в центре. Общая эффективность улавливания 98–99%. Расчеты показали следующие результаты: $\delta_{\eta=50} = 1.29 \cdot 10^{-6}$; $\sigma_\eta = 2.1$; $x_0 = 2.04$; $\eta_0 = 0.98$.

Эффективность пылеулавливания в модели батарейного газоочистителя определялась как отношение веса уловленной пыли к весу пыли, прошедшей через циклончики, который определялся как разница весов пыли, поданной в аппарат и осевшей в раздающей камере. Также определялись расход газа и сопротивление аппарата. Для циклончиков, подобных изображенным на рис. 1, с трехлопастным закручивателем и входным конфузуром на газоотводной трубке эффективность не превышала 77% (кривая 1' на рис. 3).

При отсосе запыленного воздуха из приемника в количестве 4% от поступившего эффективность увеличилась до 81% (кривая 1'' на рис. 3). Визуальные наблюдения не удалось провести из-за сильного взмучивания пыли в приемной камере, хотя слой выделявшейся пыли просматривался.

Для циклончиков с трехлопастными закручивателями без конфузуров эффективность составляла 74% (кривая 2' на рис. 3), а с отсосом запыленного газа в количестве 4% от поступившего поднялась до 78% (кривая 2''). Наблюдения показали, что выход пыли в приемник из циклончиков был прерывист, однако явных перетоков заметно не было.

П

90

80

70

60

50

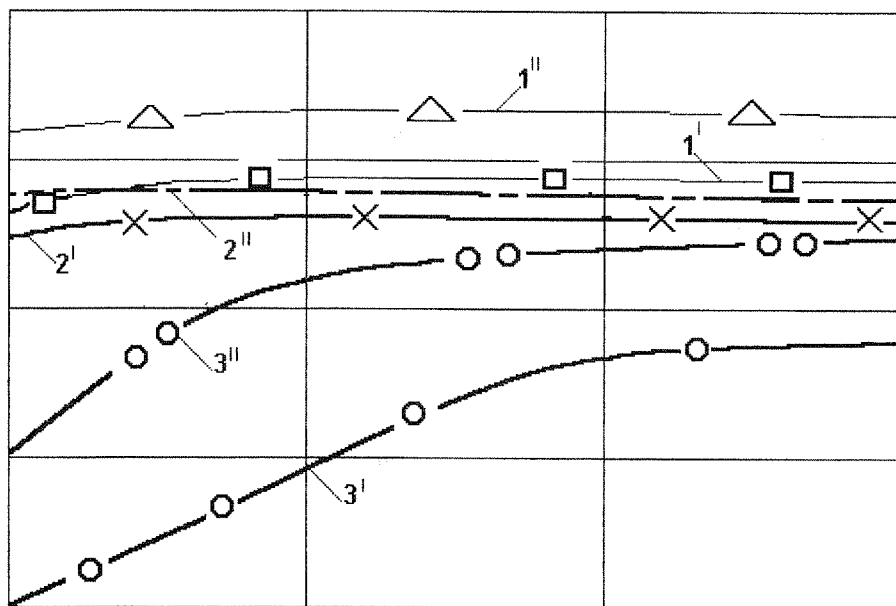


Рис. 3

Для обоих типов циклончиков эффективность осаждения пыли в диапазоне скоростей $w_0 = 3-8$ м/сек возрастала незначительно.

Были также применены циклончики с двухзаходным винтовым закручивателем (кривая 3' и 3'' — с отсосом 4%). Эффективность пылезадержания батарейным аппаратом с этими циклончиками оказалась самой низкой, причем она увеличивается с ростом w_0 . Наблюдения показали наличие перетоков и пыление дальних от входа циклончиков в камере очищенного газа.

Были проведены работы по определению степени загрузки пылью циклончиков. К пылевыводному отверстию каждого элемента присоединялся индивидуальный приемник в виде трубки диаметром 15 мм и длиной 100 мм. Уловленная пыль, попавшая в трубки, взвешивалась. Степень неравномерности распределения пыли по стоякам определялась по формуле:

$$\Delta \varepsilon = \frac{G_{\max} - G_{\min}}{G_{\text{ср}}}; \quad G_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n G_i.$$

Здесь G_{\max} , G_{\min} , $G_{\text{ср}}$ — максимальное, минимальное и среднее значение весового расхода пыли в циклончиках.

Степень неравномерности в зависимости от концентрации пыли представлена на рис. 4.

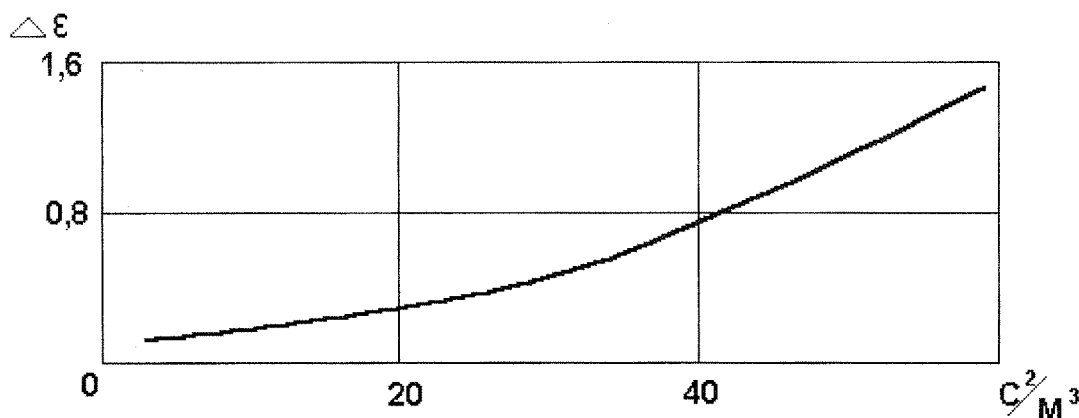


Рис. 4

Поведение кривой на рис. 4 показывает, что равномерность загрузки циклончиков пылью с увеличением концентрации частиц во входном потоке нарушается. Кроме того, с увеличением концентрации происходит фракционирование, поскольку выгруженная пыль из стояков отличалась по цвету. С увеличением концентрации возрастает сопротивление, т.к. в винтовых каналах происходит отложение пыли. Эти отложения возникают в результате попадания сгустков частиц после их сдува с внешней поверхности газоотводных трубок или при концентрировании частиц у поверхностей этих трубок.

Таким образом, в батарейном газоочистителе процессы сепарации проходят менее эффективно, чем для циклонов с индивидуальным приемником. Особенно это проявляется для высокоэффективных циклончиков с большим коэффициентом закрутки потока. Очевидно, что в этих элементах превалирующую роль играют эжекционные процессы, проходящие в приосевой области. В этой области напор имеет большое отрицательное значение, и в эту область газы поступают из сборной и приемной камер. Известны вихревые эжекторы, у которых при давлении на входе 0,3 МПа получено абсолютное давление 10^{-4} МПа (разряжение 0,00999 МПа). Поскольку осевые градиенты давления в вихревых камерах намного меньше радиальных, небольшие изменения в давлениях в выходных отверстиях потоков, которые зависят от распределения и уровня вращательной компоненты, которая в свою очередь зависит от запыленности потока, приводят к перетокам (циркуляции части газа между элементами). Причем потоки внутрь циклона идут также из газосборника (очищенный газ). Любые отклонения в размерах элементов могут привести к перетокам даже без пыли. Например, в [4,5] показано, что смещение выходного патрубка от оси на 0,4 мм значительно меняет гидродинамическую картину линий токов внутри циклона.

Элемент промышленного сепаратора относится к высокопроизводительным циклонным аппаратам с коэффициентом закрутки ($\text{tg}\beta < 1$). Гидродинамике этого элемента присущи все свойства противоточных циклонов, т.е. элемент обладает эжектирующей способностью потоков в приосевой области. Часть газа может эжектироваться из сборника очищенного газа в приемник пыли, тогда длина пылевого факела при коническом пережиге может достигать $20 \cdot 2R$ и более [6].

На рис. 5 представлена схема промышленного сепаратора, из которой следует, что факелы могут достигать дна.

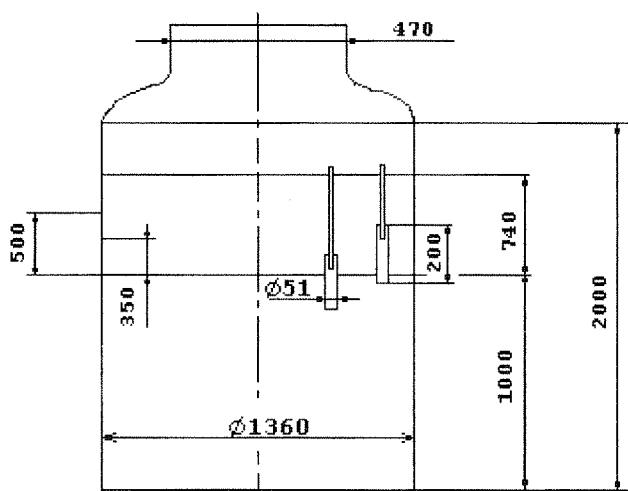


Рис. 5

Технические характеристики сепаратора следующие: расход $Q=99624 \text{ м}^3/\text{ч}$; давление в сепараторе $P=1 \text{ МПа}$, плотность газа при нормальных условиях $\rho_0 = 0.709 \text{ кг}/\text{м}^3$; число элементов $\Sigma n = 256$; сопротивление при расчетном давлении $0,5 \text{ МПа} - \Delta P \text{ МПа}$.

То, что на выходе из пылевого отверстия факел имеет большую протяженность, следует из данных по эффективности сепарации пыли в модельном элементе с осаждением частиц в трубчатых приемниках различной длины представленных в таблице 2.

Таблица 2

длина приемника, мм	50	100	200
эффективность осаждения	61	75	91

Оценка сепарирующей способности по фракциям рабочего элемента с индивидуальным приемником может быть определена по формулам (1), (2). Расчетные данные приведены в табл. 3

Таблица 3

$\delta \cdot 10^6$	7	14	28
x	0	1.33	2.67
$\eta(\delta)$	0.54	0.91	0.99

Для рабочих условий:

$$\rho = 7.09 \text{ кг}/\text{м}^3; \quad \rho_\delta = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3; \quad Q_0 = 3600 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$Q_\Sigma = Q_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho} = Q_0 \cdot \frac{P_0}{P} = 3600 \cdot 2.767 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$v = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, 2 \cdot R = 0.051 \text{ м};$$

$$F_R \cdot \Sigma n = 20.3 \cdot 10^{-4} \cdot 256 = 0.52 \text{ м}^2; \quad w_{BX} = 5,32 \text{ м}/\text{с};$$

$$\bar{r}_0 = 0.6, \quad \psi = 0.5, \quad \bar{h} = 2, \quad \text{tg} \beta = 0.84,$$

$$x = \lg \left(\frac{\delta}{\delta_{\eta=50}} \right) / \lg \sigma_\eta; \quad \eta(\delta) = \Phi(x).$$

$$\delta_{\eta=50} = 6.99 \cdot 10^{-6} (\text{м}); \quad \sigma_\eta = 1,68.$$

Исходя из анализа литературных данных по износу рабочих колес турбомашин, наиболее опасными с точки зрения износа являются частицы в диапазоне 70–120 мкм [7]. Эти частицы способны к жгутообразованию в каналах колес и не рассеиваются за счет рикошетирования. Элементы с трехлопастным закручивателем могут выделять частицы 30 мкм с эффективностью более 99% при условии отсутствия перетока и удалении отсепарированной пыли из приемника.

Опыт эксплуатации установок по переработке природного газа показал, что имеет место залповое поступление пыли, которое происходит в весенне-летний период из-за срыва отложений со стен газопровода, а также неудовлетворительной работы систем газоочистки [8].

В этой ситуации рассмотренный сепаратор перестал выполнять свою функцию из-за засорения части циклончиков и возникновения перетоков. Очевидно, что отвод части газа из подсепарационного пространства так же не решил бы проблемы.

Еще одним неблагоприятным обстоятельством явился абразивный износ циклончиков. Анализ технических показателей различных батарейных газоочистителей с циклонными элементами показал, что более надежными элементами являются циклоны фирмы "Энергоуголь" [9].

Такой циклон тоже создает длинный факел в пылесборнике. Каждый циклон имеет один полуулиточный ввод, который способствует организации симметрии течения, и меньший размер выходного патрубка при приемлемом коэффициенте гидравлического сопротивления. Как показал опыт эксплуатации многих газоочистительных систем на основе батарейных сепараторов с использованием этих элементов, засорение их не наблюдалось [9].

Применение диффузорного патрубка при выходе пыли сокращает длину факела. Применение индивидуальных стояков с затворами непрерывной выгрузки пыли способствует повышению эффективности обеспыливания в сепараторе до значения, равного эффективности обеспыливания в индивидуальном циклоне, при этом могут быть применены высокоэффективные элементы.

Были рассмотрены варианты разгрузителей потока от пыли при высоких концентрациях. Наиболее предпочтительным, с экономической точки зрения, оказалось техническое решение со встроенными инерционными сепараторами из V-образных элементов в отстойники на вводе в параллельные участки газопроводов.

При обтекании потоком этих элементов [10] у поверхности происходит концентрирование частиц, концентрат с частью газа попадает в ловушки, газ выходит вверх из отсека - обтекателя, а пыль из ловушек ссыпается вниз. Чем крупнее частицы, тем с большей вероятностью они выделяются из потока. В этом сепараторе [10] выделяются и достаточно мелкие частицы, однако эффективность их выделения зависит от равномерности поля скоростей потока и первоначальной турбулентности, которые зависят от положения запирающих органов. Этот сепаратор с V-образными элементами в силу конструктивных особенностей газохода не имел стабилизирующих поток направляющих лопаток, поэтому сепарирующие элементы находились в неодинаковых условиях. Предполагалось, что эти устройства будут полезными для диспергации ступок частиц, которые поступают в систему, т.е. произойдет сглаживание пиков, выравнивание концентрации во времени после залпового поступления пыли.

В результате проведенных мероприятий по монтажу инерционных сепараторов, замене циклонных элементов, отвода 4% газа из подсепарационного отсека на печи риформинга, поступление крупных частиц в компрессор не обнаружено, износ рабочих колес незначителен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Масштабный переход в химической технологии. Разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования/ Под ред. А.М. Розена. М.: "Химия", 1980, 319 с.
2. Василевский М.В., Мальцев А.К., Перков В.В., Танков Н.К., Богданов А.Л. Эффективность сепарации частиц в вихревых камерах// Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (доклады Всероссийской научной конференции). Томск: изд-во Томского университета, 1998, С. 276—277.
3. Справочник по пыле- и золоулавливанию/ Под. общей ред. А.А. Русанова. — 2е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 312 с.
4. Смит мл. Экспериментальное изучение вихря в циклонном сепараторе. Техническая механика. Труды американского общества инженеров-механиков, русский перевод. 1962, № 4, С. 229—236.
5. Смит мл. Анализ вихревого потока в циклонном сепараторе. Техническая механика. Труды американского общества инженеров-механиков, русский перевод. 1962, № 4, С. 237—248.
6. Аэродинамика закрученной струи. Под ред. Р.Б. Ахмедова. М.: "Энергия", 1977.
7. Абрамов Ю.И., Балусов В.А., Силян А.В. Некоторые закономерности износа и прогнозирования пылевой эрозии рабочих колес центробежных компрессорных машин. — Тр. ЦКТИ, 1980. Вып. 181. С. 91—100.
8. Шавкин Н.К. Очистка природного газа на магистральных газопроводах. — М., 1973.
9. Потапов О.П., Кропф Л.Д. Батарейные циклоны. — М.: "Энергия". 1977, 152 с.
10. Страус В. Промышленная очистка газов. Пер. с англ. — М.: Химия, 1981, 616 с.

УДК 533.6.011.35

ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

В.М. ГАЛКИН

В рамках одномерной стационарной модели газовой динамики рассматривается течение в сопле Лавалья в режиме запираания. Полагается, что внутри рассматриваемой области существует только одна точка, в которой число Маха (M) равно единице, причем M вдоль сопла монотонно возрастает от дозвукового до сверхзвукового значения. Итерационный метод строится на основе поиска минимума дополнительной функции, обладающей единственным минимумом в точке $M=1$. Апробация проводилась путем сравнения с методом установления для двухфазного течения.

Введение

В настоящее время, несмотря на широкое использование двумерных и трехмерных методик при моделировании газодинамических течений, одномерные модели попрежнему остаются в арсенале численных методов. Одномерные модели широко используются при расчете двухфазных течений смеси газа и конденсата через дросселирующие устройства и сопла, при расчете эжекторных устройств со сверхзвуковым режимом истечения, при расчете течений с энергоподводом, при моделировании процессов в МГД генераторах. Прежде всего, это связано с тем, что одномерная