

вого ДВС с наддувом. На основании анализа экспериментальных данных предложена методика выбора значения  $\pi_k$  в зависимости от содержания  $\text{CO}_2$  в биогазе для данного типа ДВС.

### Литература

1. Быков Г.А. Детонационные ограничения при использовании альтернативных топлив в двигателях с искровым зажиганием // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1995. – № 3. – С. 3 – 9.
2. Lindstrom F. Empirical Combustion Modeling in SI Engines: thesis: MMK 2005:19 / F. Lindstrom. – Stockholm, 2005. – 126 p.
3. Franzke D. E. Beitrag zur Ermittlung eines Klopfkriteriums der ottomotorischen Verbrennung und zur Vorausberechnung der Klopfgrenze: dissertation / Franzke D. E. – Munchen, 1981. – 210 p.
4. Кузьменко А. П. Покращення показників малолітражного газового двигуна з іскровим запалюванням за рахунок вибору параметрів, що визначають процес згоряння: автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки». – Харків, 2012. – 20 с.
5. Абрамчук Ф.И., Кабанов А.Н., Липинский М.М. Выбор степени сжатия и давления наддува газового двигателя средней мощности с искровым зажиганием // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 8 – 13.
6. Gao J. Knock Modelling in S.I. Engines: PhD thesis: 115.01.02 / Gao Juan. University of Calgary, 1993. – 230 p.
7. Абрамчук Ф.И., Кабанов А.Н., Кузьменко А.П., Липинский М.С. Критерий детонации в газовом двигателе с высокоэнергетической системой зажигания // Автомобильный транспорт. – 2011. – № 28. – С. 43 – 51.
8. Attar A. A. Optimization and Knock Modelling of a Gas Fueled Spark Ignition Engine: PhD thesis: 115.01.02 / Attar Alireza Alizadeh. University of Calgary, 1997. – 248 p.
9. Bade Shrestha S.O. A Predictive Model for Gas Fueled Spark Ignition Engine Applications / Bade Shrestha S. O., Karim G. A. – Calgary, CA: University of Calgary, 1999. – 18 p. – (Preprint / University of Calgary: SAE 1999-01-3482).
10. Karim G. A. A Criterion for Knock for Spark Ignition Engines: Proceedings of International Symposium «COMODIA 94». – Calgary, Canada: NEW JEC Inc., 1991. – P. 193 – 198.
11. Маамри Р., Адамчук Ф.И., Кабанов А.Н. и др. Выбор и обоснование регулировочных параметров газового двигателя с наддувом, конвертированного из дизеля // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Нові рішення в сучасних технологіях. – № 54. – Вестник НТУ «ХПИ», 2011. – С. 18 – 26.

### **Мокрая очистка воздуха от пыли в инновационной орошаемой насадке регулярной структуры для вентиляции кабин колесных и гусеничных машин**

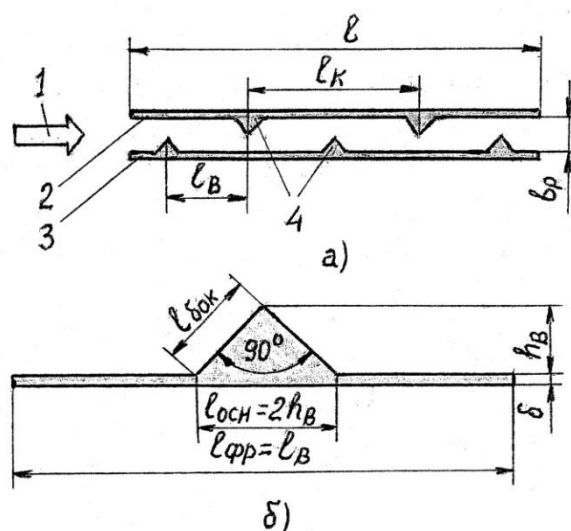
д.т.н. проф. Михайлов В.А., к.т.н. доц. Шарипова Н.Н.,  
к.т.н. доц. Есеновский-Лашков М.Ю.  
Университет машиностроения,  
(495) 223-05-23, доб. 1587, [trakvc@mami.ru](mailto:trakvc@mami.ru)

*Аннотация.* Рассмотрен механизм мокрой очистки воздуха от пыли в инновационной орошаемой насадке регулярной структуры, выполненной из пластин пористой пластмассы, снабжённых в воздушных каналах треугольными выступами, расположенными поперёк потока для его искусственной турбулизации. Выявлена функциональная связь между эффективностью очистки воздуха от пыли и снижения его температуры при адиабатном увлажнении.

*Ключевые слова:* орошаемая водой насадка регулярной структуры, мокрая очистка воздуха от пыли, эффективность очистки, эффективность снижения

*ния температуры, искусственная турбулизация воздушного потока, интенсификация тепло-массообмена.*

Кабины машин, работающих в запылённых условиях, должны оснащаться различными аппаратами для обработки приточного воздуха в том числе фильтрами для его очистки, поскольку содержание пыли в наружном воздухе существенно превышает предельно допустимую концентрацию в зоне дыхания водителя. При этом в ней присутствуют наряду с крупно- и среднелдисперсными фракциями ( $d_{\text{ч}} = 140 \dots 10$  мкм) и мелкодисперсные частицы ( $d_{\text{ч}} = 10 \dots 1$  мкм), представляющие наибольшую опасность для человека. Как показали исследования [1], в нашем случае целесообразна двухступенчатая очистка воздуха: первая ступень – контактный сухой или иной фильтр для отделения крупно- и среднелдисперсной пыли; вторая ступень – мокрый фильтр для улавливания мелкодисперсной пыли с эффективностью очистки не менее  $\eta = 0,89$  (т.е. 89%). В этом плане практический интерес представляют аппараты в виде орошаемой насадки регулярной структуры, которые при выполнении функции адиабатного увлажнителя-охлаждителя воздуха обладают возможностью осуществлять и его мокрую очистку от мелкодисперсной пыли. Поскольку же существуют различные конструкции таких насадок [2–9], рассмотрим механизм осаждения пылевых частиц на смоченных поверхностях насадки из пластин пористой пластмассы на примере инновационной насадки, схема которой показана на рисунке 1.



**Рисунок 1. Формирование воздушного канала в инновационной насадке: а – общая схема (вид сверху); б – фрагмент пластины с треугольным выступом (увеличено); 1 – поток воздуха; 2 и 3 – пластины; 4 – выступы**

Особенностью здесь является наличие на двух стенках воздушных каналов периодически расположенных треугольных выступов, обуславливающих искусственную турбулизацию потока. Прежде всего отметим, что частицы пыли размером  $d_{\text{ч}}$  менее 10 мкм и в особенности меньше 5 мкм относятся к несмачиваемым и плохо смачиваемым независимо от их состава [10]. Вследствие этого такие частицы могут быть задержаны водой при одном условии – их кинетическая энергия должна быть достаточной, чтобы пробить плёнку поверхностного натяжения слоя воды на пластинах аппарата. Это условие может быть выполнено только при относительно больших скоростях столкновения частицы пыли с указанной плёнкой. Что же касается возможного отрыва частиц пыли и возвращения их обратно в поток воздуха (вторичный унос), то при толщине водяного слоя более  $d_{\text{ч}}$  энергия отрыва частицы значительно превосходит энергию её погружения в этот слой. Поэтому при реальной толщине слоя воды до 0,2...0,3 мм вторичный унос погружённой в него частицы пыли практически невозможен [10].

Однако, частица пыли всё же может возвратиться в поток воздуха, если она столкнётся с уже закрепившейся в слое частицей. Отсюда следует вывод – для исключения вторичного уноса пыли в поток воздуха и снижения вследствие этого эффективности его очистки необ-

ходимо обеспечить течение слоя воды по пластинам для удаления с них захваченных ранее частиц. Особенно это необходимо при повышенной концентрации пыли в обрабатываемом воздухе. Показательным в этом плане является выражение [10] для скорости, при которой возможен отрыв частиц с влажной поверхности:

$$v_{\text{отр}} = 73,5/d_q, \text{ м/с}. \quad (1)$$

Из представленного выражения видно, что частицы пыли даже при  $d_q = 10$  мкм надёжно удерживаются водой при скорости воздушного потока более 7 м/с. Однако, крупнодисперсные частицы, например с  $d_q = 100$  мкм (хотя размер и меньше указанной выше толщины слоя воды), не могут быть задержаны смоченной пластиной и будут отскакивать от неё даже при скорости потока воздуха порядка 1 м/с.

Ясно, что во влажных аппаратах может осуществляться очистка воздуха только от мелкодисперсных частиц пыли. Вместе с тем, как указывалось, это плохо смачиваемые частицы не могут быть уловлены смоченными пластинами аппарата при соударении с водяным слоем при малых скоростях. Это характерно для насадок с ламинарным течением потока воздуха при  $Re < 1000$  [10], поскольку здесь частицы пыли движутся практически касательно по отношению к плоскости смоченных пластин, т.е. динамическая скорость их соударения с влажной поверхностью близка к нулю.

В нашем случае речь идёт об адиабатной насадке с искусственной турбулизацией воздушного потока с помощью расположенных поперечно ему треугольных выступов, и процессы осаждения пыли в ней обусловлены следующими факторами.

Согласно информации [11–13] высокой эффективностью по очистке воздуха от мелкодисперсной пыли обладают трубчатые и пластинчатые насадки со смоченными каналами, в которых обеспечивается турбулентный характер движения потока воздуха за счёт высокой скорости этого потока. Эффективность очистки воздуха при турбулентном переносе и осаждении частиц, в частности в трубе определяется формулой:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{4v_{\text{т}} l_{\text{тр}}}{v d_{\text{тр}}}}, \quad (2)$$

где:  $d_{\text{тр}}$  – диаметр трубы, м;  $v_{\text{т}}$  – скорость турбулентного осаждения частиц, м/с;  $l_{\text{тр}}$  – длина трубы, м;  $v$  – скорость воздушного потока, м/с.

Как указывается [12, 13], турбулентными пульсациями воздушного потока практически полностью увлекаются частицы с размером  $d_q \leq 60$  мкм. В формуле (2) неизвестной для нас составляющей является  $v_{\text{т}}$ , и задача заключается в изыскании корреляционного параметра, определяющего эту скорость. Указанная задача для насадок с гладкими поверхностями была решена в работе [11], где получена зависимость:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{0,46 l}{Re^{0,125} d_y}}. \quad (3)$$

Здесь  $l$  – длина воздушного канала в аппарате, м;  $d_y$  – эквивалентный диаметр канала, м.

В дальнейшем анализе процесса осаждения частиц пыли на влажных пластинах при турбулентном их переносе целесообразно и правомерно ввести понятие – число единиц переноса вещества  $N_{\text{в}}$ , что согласуется с аналогичным подходом при оценке зависимости между степенью очистки воздуха от пыли и затратами на это энергии [14]. Тогда можно записать, что:

$$\eta = 1 - e^{-N_{\text{в}}}. \quad (4)$$

Здесь из выражения (3) следует:

$$N_{\text{в}} = 0,46l / (Re^{0,125} d_y). \quad (5)$$

Поскольку в нашем случае речь идёт о плоскощелевой насадке, преобразуем выражение (5), имея в виду, что для таких аппаратов принято считать, что  $d_y = 2b_p$ . Тогда получим:

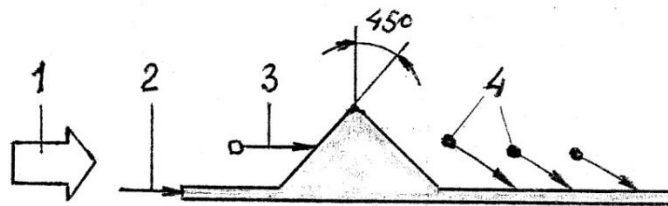
$$N_{\text{в}} = 0,23l / (Re^{0,125} b_p). \quad (6)$$

В этом выражении  $Re = v d_y / \nu$ , где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха. Приняв для наших условий [1] значение этого коэффициента  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, после соответ-

ствующей подстановки в выражение (6) получим:

$$N_{\hat{A}} = 0,0528 l / (v^{0,125} b_{\delta}^{1,125}). \quad (7)$$

Однако, это выражение учитывает лишь турбулентное осаждение частиц пыли, в то время как инновационной насадке осуществляется их дополнительная сепарация, что поясняется при рассмотрении соответствующей схемы на рисунке 2.



**Рисунок 2. Схема осаждения частиц пыли на пластине (фрагмент): 1 – поток воздуха; 2 – направление динамического воздействия на торец пластины; 3 – направление динамического воздействия на выступ пластины; 4 – направление турбулентного воздействия на поверхность пластины**

Из этой схемы следует, что единственным местом, где скорость соударения частиц пыли с влажной поверхностью пластины равняется скорости входящего воздушного потока 1 (лобовой удар), является фронтальный торец. Поэтому здесь могут оседать даже частицы размером  $d_{\text{ч}} = 0,1$  мкм [10].

Однако, следует учитывать, что если в указанном месте не организовать достаточное удаление задерживаемой пыли, то она будет накапливаться здесь многорядным слоем, который может быть сорван воздушным потоком и увлечён им в канал. Это приведёт к забиванию входной части насадки влажным пылевым конгломератом [10]. Следовательно, для обеспечения надёжности работы насадки путём удаления оседающей на торцах пластин пыли необходимо применить фронтальное орошение. Вместе с тем из-за относительно малой площади торцов доля задержания пыли здесь весьма невелика [1] и поэтому в дальнейшем не учитывается.

Как показано выше, на гладкой стороне пластин осаждение пылевых частиц обуславливается турбулентным переносом. При этом по данным [12] вызванная турбулентными пульсациями динамическая скорость  $v_{\text{д}}$  соударения их с пластиной составляет не менее 0,2 м/с, что является достаточным для эффективного улавливания пыли с фракциями 20...30 мкм. Что же касается выступов, то здесь (рисунок 2) при контакте с их поверхностью частиц пыли (удар под углом  $45^\circ$ ) скорость соударения равняется  $v_{\text{д}} = v \cos 45^\circ$ . Тогда при характерных для наших насадок  $v = 1,5...3$  м/с  $v_{\text{д}}$  составит не менее 1 м/с, что по данным [12] достаточно для преодоления сопротивления плёнки поверхностного натяжения воды даже частицами пыли размером  $d_{\text{ч}} = 1$  мкм.

Таким образом, по сравнению с пластинчатыми насадками с гладкими стенками инновационная насадка с треугольными выступами в воздушных каналах должна обладать повышенной эффективностью пылеочистки.

В связи с этим формула (4) должна быть скорректирована в сторону некоторого увеличения значения числа единиц переноса вещества:

$$N_{\hat{a}_0} = N_{\hat{a}_1} \hat{A}_1, \quad (8)$$

где:  $A_0$  – безразмерный численный коэффициент, зависящий от характера влияния выступов на процесс очистки воздуха от пыли.

Тогда для инновационной насадки имеем:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{0,0528 \hat{A}_1}{v^{0,125} \hat{a}_1^{1,125}}}. \quad (9)$$

При оценке влияния выступов на процесс очистки воздуха от пыли на основе рисунка 2 в первую очередь можно предположить, что с увеличением их количества в канале эффективность аппарата повысится. Однако, следует иметь в виду, что с точки зрения оптимизации тепло – массообмена в адиабатной насадке при искусственной турбулизации потока воздуха

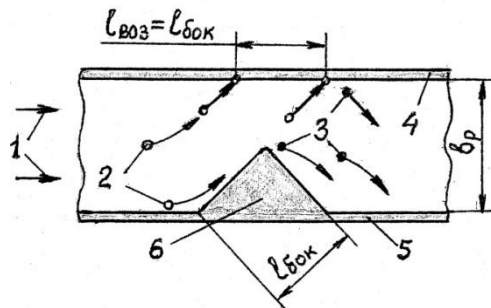
количество выступов по длине пластины  $l$  ограничивается их рациональным шагом, величина которого лежит в довольно узком диапазоне  $l_{\text{в}}^{\text{опт}} = (13 \pm 1) h_{\text{в}}$  [1]. Это ограничение позволяет оценить влияние выступов следующим образом.

В формуле (9) поверхность пластин характеризуется их конструктивной длиной  $l$ . При постоянных  $l$  и высоте пластины  $h$  выступы несколько увеличивают рабочую поверхность этой пластины, на которой собственно и происходит оседание частиц пыли. Тогда логично считать, что коэффициент  $A_o$  должен увязывать приведенную (рабочую) длину  $l_{\text{пр}}$  поверхности пластин, снабжённых выступами, с конструктивной длиной  $l$  пластин.

Чтобы оценить это, обратимся к рисунку 1,б. Полагая, что  $l_{\text{бок}} = h_{\text{в}} \sqrt{2}$ , отношение приведенной длины насадки  $l_{\text{пр}}$  к её конструктивной длине  $l$ , характеризующейся здесь  $l_{\text{в}} = l_{\text{в}}^{\text{опт}} 13 h_{\text{в}}$ , получим:

$$l_{\text{пр}} / 13 h_{\text{а}} = (13 h_{\text{а}} - 2 h_{\text{а}} + 2 h_{\text{а}} \sqrt{2}) / 13 h_{\text{а}} = 1,06. \quad (10)$$

Таким образом, в рамках  $A_o$  показатель степени в формуле (9) должен быть увеличен на такую величину. Однако, это не в полной мере отражает влияние выступов на процесс очистки пыли, что поясняется рисунком 3.



**Рисунок 3. Принципиальная схема взаимодействия струй воздушного потока и частиц пыли в нём с элементами поверхности пластин в канале насадки: 1 – струи входящего потока воздуха; 2 – отраженные выступом струи потока; 3 – течение струй после выступа; 4 – пластина напротив выступа; 5 – пластина с выступом; 6 – выступ**

Как отмечалось, на передней (фронтальной) части выступов происходит динамическое оседание пыли. При этом, в силу взаимодействия воздушного потока с наклонённой к нему под углом  $45^\circ$  поверхностью фронтальной части выступа он изменяет своё направление, и содержащиеся здесь частицы пыли ударяются под таким же углом о противоположную пластину.

Считая условно, что входящий в канал шириной  $b_p$  поток воздуха 1 движется двумя частями (в соответствии с высотой выступов  $h_{\text{в}}$ ), можно предположить следующее. При обтекании выступа 6 струи 2 воздействуют на поверхность пластины 4 на участке  $l_{\text{воз}}$ , площадь и длина которого соизмерима с площадью и длиной  $l_{\text{бок}}$  фронтальной части выступа 6. Проходя далее по каналу около пластины 4, струи потока будут взаимодействовать со следующим по его ходу выступом, расположенным на пластине 4 (здесь не показан, см. рисунок 1,а). Таким образом, в канале осуществляется зигзагообразное движение потока воздуха.

Отсюда следует, что коэффициент  $A_o$  в целом должен учитывать и эту функциональную особенность выступов в части влияния на процесс осаждения пыли на поверхности пластин вследствие появления дополнительных участков динамического воздействия частиц пыли. Исходя из предположения, что в пластинах условно увеличивается площадь и длина  $l_{\text{усл}}$  осаждения частиц за счёт указанного участка  $l_{\text{воз}} = l_{\text{бок}}$ , по аналогии с выводом выражения (10) правомерно получить следующее отношение в рамках  $A_o$ :

$$l_{\text{опт}} / 13 h_{\text{а}} = (13 h_{\text{а}} + h_{\text{а}} \sqrt{2}) / 13 h_{\text{а}} = 1,11. \quad (11)$$

С учётом (10) в итоге получим  $A_o = 1,18$ . Тогда, исходя из выражения (9), получим:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{0,0623l}{v^{0,125}b_{\delta}^{1,125}}}. \quad (12)$$

В результате получим:

$$N_{\text{ао}} = 0,0623 l / (v^{0,125} b_{\delta}^{1,125}). \quad (13)$$

После преобразования этого выражения получим формулу для определения конструктивной длины пластины:

$$l = 16,05 N_{\text{ао}} v^{0,125} b_{\delta}^{1,125}. \quad (14)$$

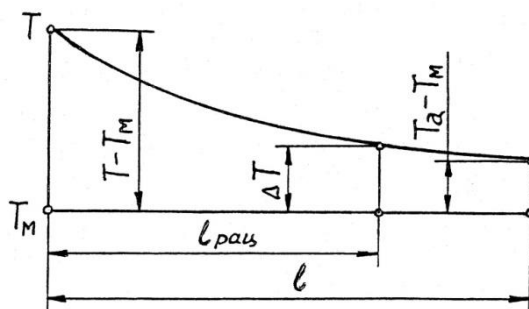
Выражения (13) и (14) справедливы для насадок, в которых процесс осаждения пыли осуществляется при постоянной температуре обрабатываемого воздуха. Однако показано [6], что при наличии в аппаратах температурного градиента возникает так называемый термофорез, сущность которого заключается в следующем.

В адиабатной насадке, где поверхность пластины имеет температуру ниже температуры обрабатываемого воздуха, взвешенные частицы пыли испытывают силовое (динамическое) воздействие со стороны более тёплого потока воздуха, что вынуждает их перемещаться в направлении более холодной части. Это явление обусловлено более высокой скоростью молекул воздуха с «горячей» стороны потока, которые за счёт своеобразной бомбардировки перемещают частицы пыли в сторону «холодной» стороны потока.

Как указывается в работе [11], величина силы термофореза прямо пропорциональна градиенту температуры и обратно пропорциональна абсолютному значению температуры поверхности. Поскольку термофорез осуществляется под действием молекул воздуха, то такому переносу могут быть подвержены лишь мелкодисперсные частицы пыли с размером  $d_{\text{ч}} = 0,1 \dots 3$  мкм [11].

Так как в нашем случае вопрос очистки воздуха с указанными фракциями является чрезвычайно важным, а насадки адиабатного охлаждения (увлажнения) обладают потенциальной возможностью осаждения пыли в результате термофореза, рассмотрим это явление с точки зрения его количественной оценки применительно к рассматриваемой насадке.

На рисунке 4 показан характер изменения температурного напора в канале насадки при контакте потока воздуха с поверхностью влажной пластины при его адиабатном охлаждении [15].



**Рисунок 4 . Изменение по длине влажной поверхности температурного напора между воздухом и водой при его адиабатной охлаждении:  $T$  – абсолютная начальная температура обрабатываемого воздуха по сухому термометру;  $T_a$  – абсолютная температура охлаждённого воздуха по сухому термометру;  $T_m$  – абсолютная температура воздуха по мокрому термометру**

Из рисунка 4 следует, что изменение температуры обрабатываемого воздуха от  $T$  до  $T_a$  носит асимптотический характер (в пределе – до  $T_m$ ), и если начальный температурный напор относительно велик ( $\Delta T_{\text{нач}} = T - T_m$ ), то в конце поверхности он изменяется незначительно. Отметим, что в идеальном случае, когда  $l = \infty$  и конечная температура обрабатываемого воздуха равна его температуре по мокрому термометру ( $T_a = T_m$ ), термофореза нет.

Поскольку осаждение пыли на поверхности пластин за счёт термофореза происходит на фоне её турбулентного и инерционного (динамического) осаждения, то здесь речь идёт, по существу, о дополнительной очистке воздуха с эффективностью  $\Delta \eta_t$ , и величина добавки

максимальна при перепаде температуры  $\Delta T_{нач}$ . Затем она будет уменьшаться по ходу потока воздуха. Очевидно, что существует какой-то участок поверхности длиной  $l_{рац}$  с перепадом  $\Delta T$ , оцениваемым соответствующим температурным коэффициентом эффективности адиабатного охлаждения  $E_a$  [15], где влияние термофореза достаточно значимо, и его следует учитывать в расчётах степени пылеочистки.

При дальнейшем исследовании необходимо выявить функциональную связь между эффективностью осаждения пыли при термофорезе и температурно-влажностными параметрами обрабатываемого воздуха с установлением границ их влияния на термофорез при адиабатном увлажнении. Однако, прежде всего необходимо отметить следующее.

При термофорезе осуществляется перенос частиц пыли, и здесь возникает определённое подобие между ним и процессами тепло- и массопереноса при адиабатном увлажнении. В частности, как при термофорезе, так и при адиабатном увлажнении осуществляется перенос массы вещества. Учитывая, что в нашем случае поток массы водяных паров направлен от влажной поверхности в поток воздуха [14], правомерен вопрос, не будет ли это блокировать перемещение частиц пыли к указанной поверхности при термофорезе.

Если предположить, что явление термофореза должно влиять на перемещение водяных паров, то в нашем случае их поток должен быть направлен в сторону влажной поверхности. Однако, этого при адиабатном увлажнении не происходит, как и не нарушается в каналах перемещающимися водяными парами процесс теплообмена между ядром потока воздуха и холодной влажной поверхностью. Указанное обусловлено тем, что перенос в ядро потока массы лёгких молекул водяных паров вызывается действием разности парциальных давлений [15], в то время как при теплообмене перенос более тяжёлых (по сравнению с молекулами водяных паров) молекул воздуха из ядра потока является следствием температурного напора (как и термофореза).

Таким образом, механизм переноса лёгких молекул водяных паров при адиабатном увлажнении отличается от механизма перемещения более тяжёлых частиц пыли при термофорезе под действием температурного напора. Поэтому можно полагать, что массоперенос водяных паров в нашем случае не будет осложнять термофорез даже частиц размером менее 0,1 мкм.

Итак, при наличии температурного градиента  $T_a - T_m$  в адиабатной насадке может быть осуществлён термофорез мелкодисперсной пыли. Поскольку это, как отмечалось, происходит на фоне турбулентного и динамического осаждения на влажной поверхности и более крупных частиц, увеличение степени очистки пыли вследствие термофореза будем рассматривать как некоторую добавочную величину:

$$\eta_{i\text{ду}} = \eta + \Delta\eta_t. \quad (15)$$

Как указывалось ранее, величина термофорезитической силы, а следовательно и степени осаждения частиц пыли при этом, прямо пропорциональна градиенту температуры  $\Delta T$  и обратно пропорциональна её абсолютному значению  $T_m$ . Тогда можно записать:

$$\Delta\eta_t = (\dot{\partial}_a - \dot{\partial}_i) / \dot{\partial}_i. \quad (16)$$

При адиабатном увлажнении согласно [15] зависимость  $T_a$  от температурно-влажностных параметров обрабатываемого воздуха выражают через коэффициент эффективности  $E_a$ :

$$\dot{\partial}_a = \dot{\partial} - \dot{A}_a (\dot{\partial}_a - \dot{\partial}_i). \quad (17)$$

Подставляя (17) в (16), получим:

$$\Delta\eta_\partial = (\dot{\partial}_a - \dot{\partial}_i) (1 - \dot{A}_a) / \dot{\partial}_i, \quad (18)$$

или

$$\Delta\eta_\partial = (t - t_i) (1 - \dot{A}_a) / \dot{\partial}_i, \quad (19)$$

где:  $t$  и  $t_m$  – в °С.

Из этого следует, что в случае предельно высокой степени адиабатного увлажнения ( $E_a$

близок к 1)  $\Delta\eta_T$  практически равен нулю, т. е. явление термофореза прекращается. Если же температурный напор отсутствует ( $t_m - t$ ), то термофорез не наступает.

В общем виде выражение для суммарной эффективности улавливания пыли в адиабатной насадке имеет вид:

$$\eta_{i\text{а\u0430}} = \eta + (t - t_i)(1 - \dot{A}_a) / \dot{O}_i. \quad (20)$$

Однако, в таком виде эта формула не может быть реализована из-за неясности корреляционной связи между  $\eta$  и  $E_a$ . Для решения этого вопроса используем общность метода чисел единиц переноса при теплообмене и перемещении вещества (пыли) в адиабатной насадке [1], рассмотрев задачу с позиции её длины  $l$ .

Как показано выше, конструктивная длина насадки  $l$  с позиции очистки воздуха от пыли определяется выражением (14). В то же время этот же геометрический параметр должен быть привязан к охлаждению воздуха в ней [1]. Отметим, что на основе проведенного исследования инновационной насадки (здесь не рассматривается) нами получено в этом плане для  $l$  соответствующее выражение:

$$l = -32,68 v^{0,2} b_\delta^{1,2} \ln(1 - \dot{A}_a). \quad (21)$$

Приравнявая правые части выражения (14) и формулы (21), получим:

$$16,05 N_{\text{а\u0430}} v^{0,125} b_\delta^{1,125} = 32,68 v^{0,2} b_\delta^{1,2} \ln(1 - \dot{A}_a). \quad (22)$$

Полагая, что  $N_{\text{вр}} = -\ln(1 - \eta)$  и преобразуя выражение (22), найдём:

$$\ln(1 - \eta) = 2,036 v^{0,075} b_\delta^{0,075} \ln(1 - E_a). \quad (23)$$

После преобразования этого выражения получим:

$$\eta = 1 - \dot{a}^{2,036 v^{0,075} b_\delta^{0,075} \ln(1 - E_a)}. \quad (24)$$

Приняв, что  $v = 1,5 \dots 3$  м/с и  $b_p = (2 \dots 3) \cdot 10^{-3}$ , при осреднении их значений в степени 0,075, найдём следующую функциональную связь между  $\eta$  и  $E_a$ :

$$\eta = 1 - \dot{a}^{2,32 \ln(1 - E_a)}. \quad (25)$$

Проверим правомерность использования полученного выражения, имея в виду, что по данным [1] насадка должна иметь  $E_a = 0,7 \dots 0,75$ . Тогда для среднего его значения  $E_a = 0,725$  по формуле (25) найдём, что  $\eta$  будет равен 0,95. Для сравнения по данным [1] у интенсифицированной насадки, имеющей на одной стенке каналов вертикальные выступы, а на противоположной наклонённые навстречу потока выступы, степень очистки от пыли определяется по формуле:

$$\eta = 1 - \dot{a}^{1,89 \ln(1 - E_a)}. \quad (26)$$

Тогда подсчёт по этой формуле даёт значение  $\eta = 0,914$ . Таким образом, инновационная насадка обладает несколько большей эффективностью очистки воздуха от пыли, что и должно быть в виду рационального расположения выступов а её каналах с движением в них потока воздуха «змейкой».

Что же касается  $\Delta\eta_t$ , то это проявляет себя более выражено при начальных температурах обрабатываемого воздуха  $t$  более  $30^\circ\text{C}$  [1]. Поэтому для демонстрации значимости этой прибавки примем, что в условиях жаркого сухого климата, например, в Средней Азии,  $t = 40^\circ\text{C}$  и  $t_m = 19,4^\circ\text{C}$ . Тогда по формуле (19) будем иметь для указанного  $E_a = 0,725$  величину  $\Delta\eta_t = 0,02$ , а по выражению (20) суммарный коэффициент очистки воздуха от пыли в этих климатических условиях составит  $\eta_{\text{общ}} = 0,97$ .

В заключение отметим, что продемонстрированное функциональное качество инновационной орошаемой насадки регулярной структуры, выполненной из пластин пористой пластмассы с вертикальными треугольными выступами на стенках каналов, ставит её на один уровень с лучшими современными аппаратами мокрой и сухой очистки воздуха от мелкодисперсной пыли [16].

## Литература

1. Михайлов В.А. Создание системы модульных типизированных и унифицированных



- средств нормализации микроклимата и оздоровления воздушной среды в кабинах самоходных машин: Дис... д-ра техн. наук. – М.: МАМИ, 1999.
2. Михайлов В.А. Орошаемые насадки воздухоохладителей кабин для запылённых условий эксплуатации // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1996, № 11.
  3. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Орошаемые насадки для обработки воздуха в системах колёсных и гусеничных машин // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 4.
  4. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Орошаемые насадки для обработки воздуха в кабинах тракторов и сельскохозяйственных машин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2015. Т. 1. – № 1(23).
  5. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Теоретические основы создания орошаемой насадки регулярной структуры для воздухоохладителей кабин колёсных и гусеничных машин // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №12.
  6. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Инновационный локальный водоиспарительный воздухоохладитель для кабин тракторов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №2.
  7. Шарипов В.М., Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Климатическая комфортабельность колёсных и гусеничных машин. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011.
  8. Михайлов В.А., Карев С.В. Орошаемая насадка регулярной структуры для локального воздухоохладителя кабин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008, №7.
  9. Михайлов В.А., Трелина К.В. Параметры насадки с фитильным подъёмом воды для увлажнения топливовоздушной смеси дизеля // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007, №9.
  10. Пирумов А. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981.
  11. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Наука, 1981.
  12. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981.
  13. Ужов В.П., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. – М.: Химия, 1972.
  14. Справочник по пыле- и золоулавливанию/ М.И. Биргер, А. Вальдберг, Б.И. Мягков, В.Ю. Павда, А.А. Русанов, И.И. Урбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
  15. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования воздуха. Основы расчёта и проектирования. – М.: Машиностроение, 1978.
  16. Техника и технология защиты воздушной среды: Учеб. пособие для вузов / В.В. Юшин, В.М. Попов, П.П. Кукин и др. – М.: Высшая школа, 2005.

### **Особенности технологии защиты воздушной среды объектов автотранспортного комплекса**

д.т.н. проф. Михайлов В.А., к.т.н. доц. Шарипова Н.Н., к.т.н. Есаков А.Е.  
 Университет машиностроения,  
 (495) 223-05-23, доб. 1527, [ravn@mail.ru](mailto:ravn@mail.ru)

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы нормирования санитарных параметров и технологии защиты внутренней и внешней воздушной среды стационарных и мобильных объектов автотранспортного комплекса от тепlopоступлений и вредных загрязнений с учётом их производственной специфики и требований по энергосбережению.

*Ключевые слова:* внешняя воздушная среда, внутренняя среда стационарных и мобильных объектов, приточная и вытяжная вентиляция, охлаждение воздуха, очистка воздуха от вредных примесей, энергосберегающие технологии защиты воздушной среды.

При защите воздушной среды на первый план обычно ставится охрана атмосферы от вредных производственных выбросов, в связи с чем основное внимание уделяется лишь тех-