

ратный подход, когда основное воздействие на ремень распространяется со стороны шкива, что открывает новое явление – возможное стеснённое кручение ремня. В предположении нагружения ремня, особенно вариаторного с наличием гофров, на шкиве как кручение тонкостенного стержня незамкнутого профиля, согласно теории В.З. Власова [1], получены основные зависимости, дополняющие известную теорию клиноремённых передач.

Литература

1. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
2. Феодосьев В.Н. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
3. Карбасов О.Г. Надёжность клиноремённых передач. – М.: Машиностроение, 1976. – 73 с.
4. Пронин Б.А. Клиноремённые и фрикционные передачи и вариаторы. – М.: Машгиз, 1960. – 334 с.
5. Мартынов В.К., Зверев А.И. Развитие теории клиноремённых передач // Известия МГТУ «МАМИ». № 2 (14). – 2012. – Т.1. – С. 250 – 255.
6. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 456 с.
7. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1969. – 279 с.

Орошаемые насадки для обработки воздуха в кабинах тракторов и сельскохозяйственных машин

д.т.н. проф. Михайлов В.А., к.т.н. доц. Шарипова Н.Н.

Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1587, trak@mami.ru

Аннотация. Рассмотрены конструкции плоскощелевых орошаемых насадок регулярной структуры из снабжённых выступами пластин пористой пластмассы с различным характером течения потока воздуха в их каналах. Показано, что при интенсификации тепло-массообмена за счёт искусственной турбулизации движения воздуха в каналах обеспечивается существенное уменьшение размеров насадки при достижении требуемой эффективности снижения температуры обрабатываемого воздуха и приемлемого аэродинамического сопротивления.

Ключевые слова: орошаемая водой насадка, производительность по воздуху, интенсификация тепло-массообмена, эффективность снижения температуры, аэродинамическое сопротивление.

Орошаемые водой насадки регулярной структуры относятся к аппаратам прямого действия, в которых осуществляется «мокрая» обработка воздуха с целью снижения его температуры в кабинах тракторов и сельскохозяйственных машин [1 – 4].

Физическая сущность снижения температуры воздуха по сухому термометру t_a и повышения при этом влагосодержания d_a в орошаемых насадках обусловлены естественным процессом в силу психрометрической разности его начальных температур по сухому t и мокрому t_m термометрам ($\Delta t = t - t_m$). Достигнутая при этом глубина снижения температуры t_a при постоянном t_m оценивается по температурному коэффициенту эффективности адиабатного увлажнения (прямого водоиспарительного охлаждения):

$$E_a = (t - t_a) / (t - t_m).$$

Процесс обработки воздуха при адиабатном увлажнении осуществляется при его постоянной энтальпии I (кДж/кг). Поэтому такие аппараты не обладают холодопроизводительностью, но их работа может быть оценена достигнутой величиной производительности по отведённой явной теплоте из обрабатываемого воздуха:

$$Q_{\text{я}} = c_p \rho_a L_o (t - t_a), \text{ кВт}$$

где: c_p – теплоёмкость воздуха, кДж/кг; ρ_a – плотность воздуха при температуре t_a , кг/м³; L_o – подача обрабатываемого воздуха, кг/с; t и t_a в °С.

Поскольку в адиабатных насадках снижение температуры воздуха сопровождается увеличением его влагосодержания d_a (г воды/ кг воздуха) и ростом относительной влажности φ_a (%), что определяется по известной диаграмме $I - d$ [1, 5], важным является выбор величины E_a , наиболее приемлемой с учётом граничных условий работы аппарата. Так, по требованию обеспечения на рабочем месте водителя нормируемой относительной влажности воздуха φ_k по ГОСТ 12.2.120-88, рациональная величина E_a должна быть на уровне 0,7 – 0,75 [1, 2] при расчётной начальной температуре $t = 25 - 40^\circ\text{C}$.

При создании насадок для водоиспарительных воздухоохладителей кабин в первую очередь было отдано предпочтение пористым пластинам из мипласта, которые широко выпускались промышленностью в качестве сепараторов аккумуляторных батарей и были устойчивы к действию вибрации и температурам внешней среды. Конструктивной особенностью таких пластин является то, что одна их сторона ровная, а на второй имелись параллельно расположенные продольные выступы, что обусловило возможность, варьируя размещением пластин по отношению друг к другу, создавать различные конструктивные комбинации насадок.

К наиболее простому конструктивному варианту принадлежит плоско-параллельная щелевая насадка (рисунок 1), которая использовалась в хлопководческом тракторе Т-28Х4М [5].

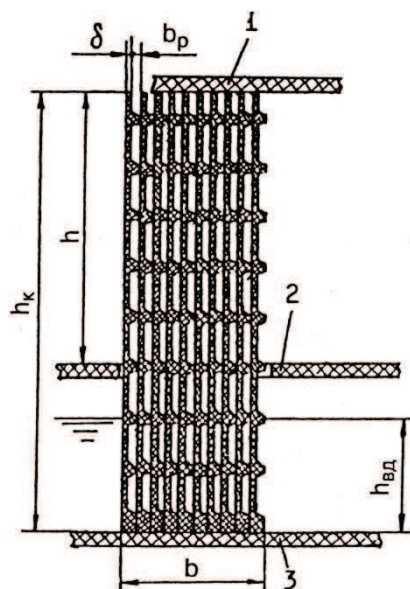


Рисунок 1. Принципиальная схема устройства и компоновки орошаемой ламинарной насадки из пластин мипласта для воздухоохладителя: 1 – крышка корпуса; 2 – перегородка поддона; 3 – днище поддона; δ – толщина стенки пластины; b_p – ширина воздушного канала; h – рабочая высота насадки; h_k – конструктивная высота насадки; b – ширина пакета насадки; $h_{вд}$ – уровень воды в поддоне

Насадка собрана в пакет из пористых пластин мипласта сепараторов аккумуляторных батарей серии ФЯ 7,525,002 с размерами в состоянии их поставки $148 \times 144 \times 1,5$ мм при шаге выступов 12 мм и толщиной стенки $\delta = 0,8$ мм, что обеспечило ширину воздушных каналов $b_p = 0,7$ мм, простирающихся вдоль этих выступов по всей длине (глубине) l в насадке (на рисунке 1 не показано). Поскольку в такой плоско-щелевой насадке сформированы гладкие воздушные каналы, она относится к типу ламинарных тепло-массообменников.

В указанной насадке увлажнение пластин осуществляется за счёт капиллярного подъёма (фитильного всасывания) воды из поддона, в который погружены их нижние концы. При

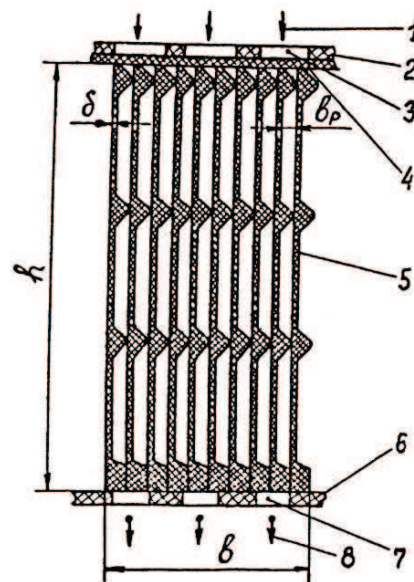


Рисунок 2. Принципиальная схема аппарата с модернизированной ламинарной насадкой: 1 – подача воды на орошение; 2 – панель водораспределителя; 3 – перфорации; 4 – гигроскопическая водораспределительная подушка; 5 – пластина из мипласта; 6 – перегородка поддона; 7 – отверстия для слива воды; 8 – слив воды

этом уровень воды в поддоне и глубина погружения пластин устанавливаются, исходя из сохранения некоторого погружения в воду одного из краёв насадки, приподнятого по отношению к горизонтали при длительной работе колёсного трактора с креном до 5° (например, при пахоте с колёсами одного борта машины в борозде). Это обуславливает существенное общее увеличение конструктивной высоты h_k пластин и насадки в целом по сравнению с её рабочей высотой h , определяющей необходимую площадь испарения F аппарата, что приводит к нерациональному перерасходу материала пластин.

В данной конструкции (рисунок 1) узкие каналы насадки ($b_p = 0,7$ мм) создают повышенное аэродинамическое сопротивление аппарата, что не выгодно с энергетической точки зрения и резко снижает надёжность его работы при наличии в обрабатываемом воздухе остаточной (после первичной фильтрации) мелкодисперсной пыли из-за её налипания в виде «язычков» на влажных передних кромках пластин с последующим попаданием в каналы и их перекрытием.

В определённой мере некоторые из указанных недостатков могут быть устранены в аппарате, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.

В этой конструкции для насадки использованы мипластовые пластины с толщиной стенки $\delta = 0,7$ мм при шаге выступов 25 мм и общей толщине пластины 2,5 мм, что обеспечило ширину воздушного канала $b_p = 1,8$ мм. Здесь рабочая высота насадки является и её конструктивной высотой. При этом в реальной насадке воздухоохладителя $h = 82$ мм, $l = 150$ мм, $b = 454$ мм в расчёте на номинальную подачу воздуха $L = 400$ м³/ч. Увлажнение пластин осуществляется за счёт капиллярного всасывания воды сверху при контакте их верхних концов с подушкой 4, насыщаемой ею через перфорации 3 из расположенного над ней короба (не показан), связанного соответствующим трубопроводом с насосом бака, установленным на полу кабины.

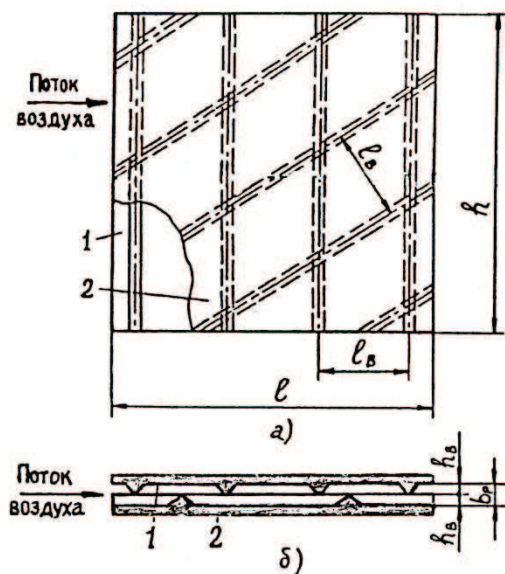


Рисунок 3. Схема формирования воздушного канала между попарно сложенными пластинами мипласта: а – вид сбоку; б – вид сверху; 1 – поток воздуха; 2 – пластина с вертикально расположенными выступами; 3 – пластина с наклонёнными выступами навстречу потоку воздуха

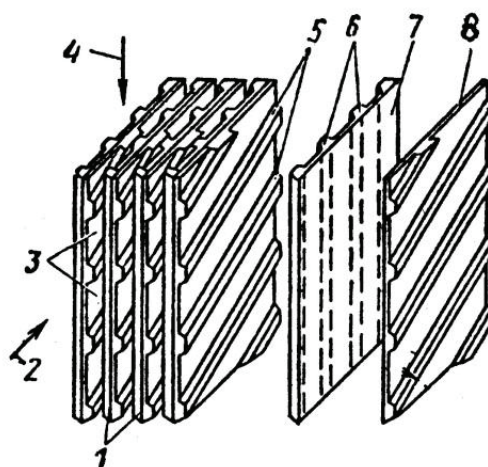


Рисунок 4. Усовершенствованная насадка из мипласта с интенсификацией тепло-массообмена: 1 – водяные микрокапиллярные каналы; 2 – поток воздуха; 3 – воздушные каналы; 4 – орошающая воды; 5 – наклонённые выступы; 6 – вертикальные выступы; 7 – пластина с вертикальными выступами; 8 – пластина с наклонёнными выступами

При такой конструкции аппарата достигнута величина E_a не более 0,75, что приемлемо. Вместе с тем в такой насадке с гладкими прямоточными каналами из-за ламинарного характера течения воздушного потока глубина насадки ($l = 150$ мм) значительна, что приводит

к увеличению размеров воздухоохладителя в продольном направлении. Кроме того, насадка с такими каналами не обладает свойствами их промывки от оседающей пыли и не может задерживать свободную воду, попадающую в воздушный поток сверху из подушки 4 при тряске и вибрации машины. Указанные обстоятельства вызвали необходимость создания конструкции более совершенной насадки, принципиальная схема попарной укладки пластин и формирования каналов в которой, представлена на рисунке 3 [1, 2].

Полный пакет насадки формируется при сложении равными сторонами друг к другу указанных сдвоенных пластин. При этом между такими сторонами пластин образуется макрокапиллярная щель, обуславливающая повышение гигроскопических качеств насадки независимо от направления подачи воды на её орошение. Конструктивная схема такой насадки показана на рисунке 4.

В рассматриваемой усовершенствованной насадке использованы два прогрессивных способа искусственной турбулизации потока воздуха для интенсификации тепло-массообмена: его периодическое дросселирование из-за сужения каналов около вершин выступов и смежной стенки пластин, а также закручивание потока воздуха в местах пересечения вертикальных и наклонённых выступов. Поскольку же поток воздуха в воздушных каналах встречает препятствие в виде указанных выступов, насадка приобретает функции сепаратора-каплеуловителя, и унос капель воды из неё практически исключается.

На основе результатов стендовых испытаний установлено [6], что при длине насадки $l = 150$ мм достигнута величина $E_a = 0,88$, которая является избыточной. При сокращённой же величине $l = 66$ мм обеспечивается приемлемая средняя величина $E_a = 0,73$. Отметим, что здесь ширина воздушных каналов составляла $b_p = 4,2$ мм.

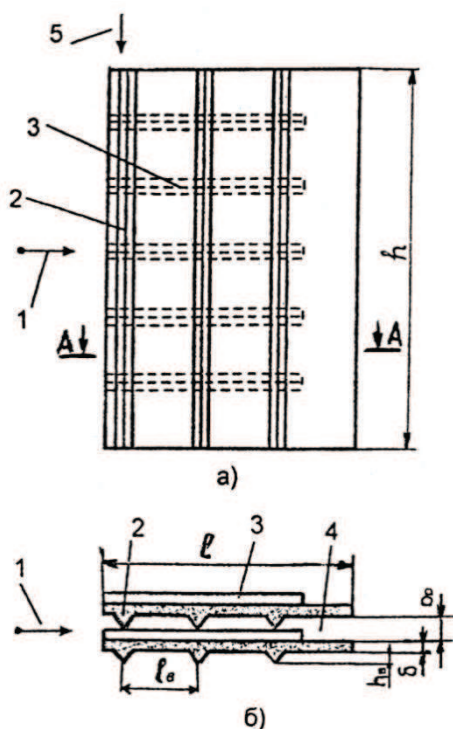


Рисунок 5. Насадки регулярной структуры с турбулизаторами на одной из главных стенок пластин: а – общая схема; б – структура воздушного канала (разрез А-А); 1 – поток воздуха; 2 – вертикальный выступ пластины; 3 – горизонтальный выступ пластины; 4 – воздушный канал; 5 – поток орошающей воды

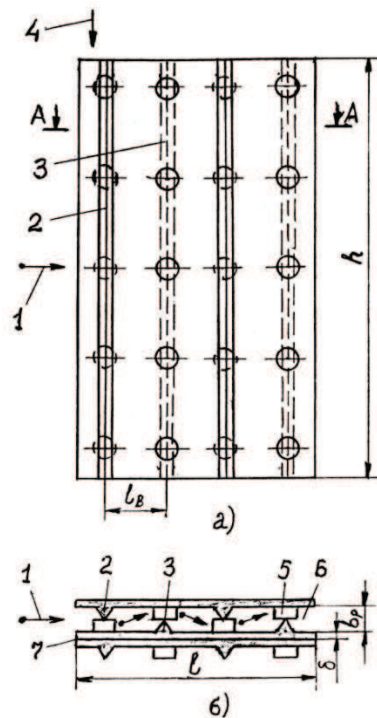


Рисунок 6. Формирование инновационной насадки регулярной структуры с турбулизаторами на двух стенках воздушного канала: а – общая схема; б – структура воздушного канала (разрез А-А); 1 – поток воздуха; 2 – вертикальный выступ первой пластины; 3 – вертикальный выступ второй пластины; 4 – поток орошающей воды; 5 – опорный вспомогательный выступ; 6 – воздушный канал; 7 – макрокапилляр

Следует указать, что интенсифицированная насадка обладает удовлетворительными качествами в части очистки воздуха от мелкодисперсной пыли, задерживаемой водой. Так по данным [7] при $E_a = 0,73$ эффективность очистки воздуха от пыли достигла $\eta = 0,915$, что достаточно высоко с практической точки зрения, учитывая наличие у воздухоохладителя первой ступени пылеочистки.

Что же касается аэродинамического сопротивления такой насадки, то по данным [6] оно не превышало $\Delta p = 78$ Па, что приемлемо при наличии в конструкции воздухоохладителя радиальных вентиляторов. Однако в случае, когда в аппарате должен быть использован осевой вентилятор [8], развиваемое давление которого ниже чем у радиального вентилятора, встаёт вопрос создания интенсифицированной насадки с более низким аэродинамическим сопротивлением. Принципиальная схема такой насадки показана на рисунке 5.

В отличие от предыдущей насадки здесь возмущение воздушного потока происходит из-за наличия вертикальных выступов 2, размещённых только на одной из главных стенок канала 4. При этом из-за сквозного просвета между вершинами выступов и стенкой смежной пластины сепарирующие качества насадки по воде снижаются, и не исключается их вынос за её пределы. Однако, когда насадка размещена в корпусе аппарата так, что выход воздушного потока из неё происходит не прямо, а с поворотом вверх в сторону вентилятора [6], выброс капель воды не страшен, поскольку они остаются внутри аппарата.

По данным [9] в реальной насадке такого типа при её $l = 70$ мм достигнуты приемлемые $E_a = 0,66$ и $\Delta p = 27,1$ Па. Вместе с тем, поскольку турбулизаторы (выступы) имеются лишь на одной стенке воздушного канала, расположенные к тому же с относительно большим шагом $l_B = 25$ мм, эффективность обработки воздуха здесь снизилась по сравнению с предыдущей насадкой, где они имеются на двух стенках (на одной – вертикальные, на другой – наклонённые).

При дальнейшей отработке интенсифицированной насадки в её основу положена конструкция, где вертикальные выступы расположены на обеих стенках воздушного канала (рисунок 6). При этом, в данной насадке выступы на одной стороне пластины смещены относительно выступов на противоположной ее стороне на середину расстояния между ними. В этом случае по сравнению с насадкой на рисунке 5 увеличивается число выступов в воздушном канале при вдвое меньшем расстоянии между ними.

Здесь необходимо отметить, что в рассматриваемой конструкции насадки необходимы короткие вспомогательные выступы 5, расположенные с определённым шагом по вертикали и служащие опорой для вершин выступов 2 и 3. В этом случае имеет место турбулизация воздушного потока как за счёт возмущения из-за поперечных препятствий на двух стенках канала, так и вследствие его движения «змейкой» при последовательном обтекании этих препятствий.

Выбор параметров инновационной насадки (рисунок 6) выполним с использованием методики, приведенной в работе [1].

Задача решается следующим образом. В первую очередь необходимо определиться с требуемым минимальным размером ширины воздушных каналов b_p , исходя из условия обеспечения компактности насадки при её допустимом аэродинамическом сопротивлении. Как показано ранее на рисунке 2, в нашем случае ширина воздушных каналов должна быть не менее 1,8 мм для исключения возможности их «захлёбывания» при орошении фронтальной части насадки потоком воды сверху. При этом одновременно с учётом указанного ограничения требуется выбрать значение рациональной скорости воздушного потока в каналах насадки. В нашем случае по данным [1, 2] она должна быть не более $v = 3$ м/с.

Наконец, необходимо выбрать подходящие к указанным граничным условиям пластины из мипласта, желательные выпускаемые промышленностью, с возможностью их минимальной доработки. В этом плане в качестве исходного изделия более всего годятся пластины сепараторов типа ЖУИЦ 757565-118 для аккумуляторных батарей с размерами в состоянии поставки $148 \times 140 \times 1,5$ мм при шаге выступов 24 мм и их высоте $h_B = 1$ мм, что согласно схеме (рисунок 6) обеспечивает ширину воздушных каналов $b_p = 2$ мм. Кроме того, при ис-

ходном шаге выступов 24 мм в результате сложения пластин парами навстречу этими выступами друг к другу по рис. 6 их шаг в воздушных каналах составит $l_B = 12$ мм. По данным [1, 2] оптимальный шаг выступов должен находиться на уровне $l_B^{\text{опт}} = 13h_B$, т. е. при $h_B = 1$ мм $l_B^{\text{опт}} = 13$ мм. В нашем случае $l_B = 12$ мм достаточно близок к $l_B^{\text{опт}}$.

Таким образом, с учётом ранее указанных габаритных ограничений в части компоновки насадки в объекте её расчётные геометрические размеры должны составлять: $h = 0,12$ м; $l = 0,03$ м; $b_p = 0,002$ м; $b = 0,318$ м при толщине стенки пластины $\delta = 0,0005$ м и ширине сдвоенных пластин $b_{\text{п}} = b_p + 2\delta = 0,003$ м. В этом случае число воздушных каналов в насадке составит $n_k = b/b_k = 106$. Если принять расчётную скорость воздушного потока в каналах $v = 3$ м/с, то производительность насадки по воздуху:

$$L = b_p h n_k v = 0,076 \text{ м}^3/\text{с} (275 \text{ м}^3/\text{ч}).$$

Это соответствует указанной ранее средней подаче воздуха системы вентиляции и отопления кабины машины при $L = 250 - 300 \text{ м}^3/\text{ч}$ [1, 2].

В результате расчетов установлено, что достижимая величина l при крайних $E_a = 0,7$ и $E_a = 0,75$ – соответственно $l_{0,7} = 0,028$ м и $l_{0,75} = 0,033$ м. Таким образом, можно заключить, что в инновационной насадке средняя величина l на уровне 0,03 м теоретически может быть достигнута. Вместе с тем это требует экспериментального подтверждения.

Что же касается аэродинамического сопротивления такой насадки, то при исходных данных $l = 0,03$ м, $n_e = 3$ и $v = 3$ м/с его величина при расходе воздуха $L = 275 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,076 \text{ м}^3/\text{с}$) будет равна $\Delta p = 100$ Па. Это приемлемо при наличии в системе вентиляции и отопления кабины машины радиального вентилятора.

С целью оценки достоверности полученных расчетных результатов были проведены экспериментальные исследования изготовленной инновационной насадки на стенде, содержащем разомкнутую аэродинамическую трубу с регулируемым по подаче воздуха радиальным вентилятором, регулируемым электронагревателем этого воздуха, соплом Вентури, компенсационными микроманометрами марки ММН-240(5)П для оценки давления и расхода воздуха в соответствии с ГОСТ 10921-90, лабораторными сухими и мокрыми термометрами с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$ для замера температуры воздуха.

Работа насадки согласно рекомендациям [1] по планированию эксперимента оценивалась на четырёх режимах подачи воздуха L в 150, 200, 250 и $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ при начальных температурах по сухому термометру обрабатываемого воздуха t соответственно в 25, 30, 35 и 40°C . Как и в работе [1], в нашем случае в указанных диапазонах изменения температуры и расхода воздуха коэффициент E_a был практически постоянен, а его величина составляла 0,72 – 0,73, что укладывается в диапазон его рациональных значений 0,7 – 0,75.

Относительно же аэродинамического сопротивления насадки можно судить по результатам эксперимента, представленным в таблице 1 и на рисунке 7.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований инновационной насадки

L, м ³ /ч	v, м/с	Δp, Па		Расхождение, %
		эксперимент	расчёт	
150	1,64	33,7	36,3	7,2
200	2,19	55,0	58,4	5,8
250	2,73	82,3	83,7	1,7
300	3,28	120,6	113,7	5,1

Из анализа полученных результатов видно, что достигнута достаточно близкая сходимость экспериментальных значений Δp с теоретическими (расхождение не более 7,2%), что свидетельствует о правомерности использования методики, приведенной в работе [1].

На рисунке 7 представлена индивидуальная аэродинамическая характеристика радиального (центробежного) вентилятора унифицированного типажа с одноконсольным вылетом вала электродвигателя постоянного тока напряжением 12В марки 19.3730, созданного в рамках системы нормализации микроклимата для кабин тракторов и сельскохозяйственных машин [1, 2]. Это даёт возможность оценить возможность обеспечения в насадке указанной

ранее подачи воздуха $L = 275 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $\Delta p = 100 \text{ Па}$.

Для этого из точки, соответствующей $\Delta p = 100 \text{ Па}$ (см. рисунок 7), проводится горизонтальная линия до пересечения с линией 2 (точка А). В результате найдём, что возможная подача воздуха вентилятором через насадку составит $L_B = 280 \text{ м}^3/\text{ч}$. Это свидетельствует о реальности достижения расчётной величины $L = 275 \text{ м}^3/\text{ч}$ при использовании инновационной насадки в установке вентиляции кабины трактора и сельскохозяйственной машины.

Таким образом, проведенный анализ и результаты исследований показали, что предложенная инновационная насадка предпочтительнее для использования её в системе обработки воздуха, поступающего в кабину трактора и сельскохозяйственной машины. При этом на изготовление такой насадки требуется меньше материалов.

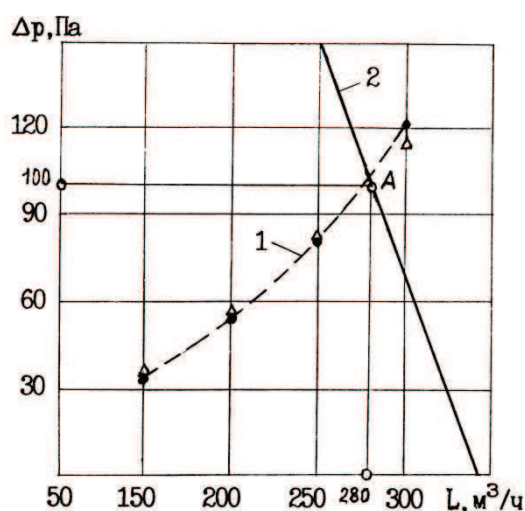


Рисунок 7. Изменение аэродинамического сопротивления от расхода воздуха:
 Δ – расчётные данные; • – экспериментальные данные; 1 – аэродинамическая характеристика насадки; 2 – индивидуальная аэродинамическая характеристика радиального вентилятора

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. Шарипов В.М., Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Климатическая комфортабельность колесных и гусеничных машин. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011.
3. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Теоретические основы создания орошаемой насадки регулярной структуры для воздухоохладителей кабин колесных и гусеничных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2014, № 12.
4. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Оценка функциональных качеств локального воздухоохладителя в кабине трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2012, № 10.
5. Фролов А.А. Изыскание способов нормализации воздушной среды в кабинах хлопководческих тракторов: Дис... канд. техн. наук. – М.: ВИМ, 1976.
6. Михайлов В.А. Орошаемые насадки из мипласта для испарительных воздухоохладителей кабин с.-х. тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 1986, № 6.
7. Михайлов В.А. Орошаемые насадки воздухоохладителей кабин для запылённых условий эксплуатации // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1996, № 11.
8. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Инновационный локальный водоиспарительный воздухоохладитель для кабин тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2014, № 2.
9. Михайлов В.А., Карев С.В. Орошаемая насадка регулярной структуры для локального воздухоохладителя кабин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008, № 7.