

## ДИСТАНЦИОННОЕ ВСАСЫВАНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

*Ю. Н. Марр, советник генерального директора АО «НПО «Тепломаш»*

*Размеры зоны активного движения во всасывающем факеле стандартных местных отсосов сопоставимы с размерами всасывающего отверстия. Дистанционное всасывание с образованием протяженного всасывающего факела считается не имеющим отношения к реальности [1, 2].*

*Между тем еще в 1974 году получено авторское свидетельство [3] на приточно-вытяжное вентиляционное устройство, в котором глубина спектра всасывания из рабочей зоны увеличивалась за счет экранирования области всасывания закрученной приточной струей, выпускаемой из внешнего контура устройства, оснащенного завихрителем. В дальнейшем были предложены разнообразные по реализации способы и устройства такого типа на основе закрученных струй [4–8]. Как правило, они предназначены для очистки и удаления вредных газов, мелкодисперсного аэрозоля и т. п., образующихся, например, при сварке, пайке и других вредных производственных процессах. В литературе, за редким исключением, отсутствуют количественные оценки и рекомендации по организации дистанционного всасывания. Физика этого явления сложна, теория его не разработана. Здесь предпринята попытка объяснить некоторые особенности феномена, дать приближенные количественные оценки размерам структуры дистанционного всасывания и рекомендации по использованию.*

1. Характерной особенностью интенсивно закрученной струи является образование примыкающей к соплу (а чаще возникающей еще внутри сопла) рециркуляционной зоны [9]. Вдоль оси симметрии рециркуляционной зоны располагается область обратных токов. Максимальный поперечный размер зоны — порядка диаметра сопла, достигается вблизи сечения выхода из сопла. В соплах с цилиндрическими вставками (кольцевые струи) максимальный размер сдвинут вниз по течению. Длина зоны от среза цилиндрического сопла достигает двух диаметров сопла. Диффузорная приставка к соплу удлиняет зону до шести диаметров основного сопла. Цилиндрическая вставка также удлиняет зону. Введение в зону отсоса в выходном сечении сопла формирует из области обратных токов всасывающий факел различной протяженности в зависимости от многих привходящих обстоятельств. Это и положено в основу всех технических решений по [3–8] (в действительности отечественных и зарубежных патентов по этому вопросу намного больше перечисленных).

Физика происходящего в закрученных струях сводится к следующему. На жидкость действуют инициированные вращением массовые (центробежные) силы, уравниваемые радиальным градиентом давления. При относительно небольшой закрутке под действием массовых сил формируется тот или иной профиль тангенциальной и осевой скорости в зависимости от конструкции закручивающего устройства. До некоторого момента течение струи в сопле и за его пределами представляет собой цельность, сформированную принудительными воздействиями закручивающих устройств на сплошную среду. Здесь подразумевается, что сплошность среды опирается не на классический (атомно-молекулярный) микроуровень, а на более крупный уровень квазидискретности, определяемый молярной структурой турбулентного течения, в отличие от физической дискретности молекулярного уровня.

Критическое превышение воздействия массовых сил (равенство максимальной тангенциальной и средней осевой скорости [9, 12]) приводит к критическому нарастанию

радиального градиента давления, вызывающего разрушение цельности. Нарушается квазисплошность среды: в турбулентном потоке возникает «пузырь» — макроструктура, называемая рециркуляционной зоной. Помимо радиального градиента давления, в пузыре формируется продольный градиент, под действием которого развивается обратный ток жидкости. Пузырь прочно сидит передней своей частью внутри сопла и выходит за его пределы на заметное расстояние. Поперечный размер пузыря близок к диаметру сопла. Форма пузыря напоминает хорошо обтекаемое осесимметричное тело. Вытекающая из сопла закрученная струя обтекает пузырь практически так же, как она обтекала бы цилиндрическую вставку, и фактически превращается на этом участке в кольцевую струю. Многочисленные иллюстрации к сказанному имеются в [9]. **Формирование гидродинамической макроструктуры (пузыря) имеет прямое отношение к явлениям самоорганизации [10] и становится в один ряд с объектами, описанными в [11].**

*Рис. 1. Схема закрученной струи с всасывающим факелом. 1 - кольцевое сопло, 2 – закручивающие элементы, 3 – всасывающий патрубок, 4 – закрученная кольцевая струя, 5 – всасывающий факел, 6 – смерчевой вихрь, 7 - пол*

2. Для незакрученных кольцевых струй на базе приближенных решений обтекания струей осесимметричного уступа [12] получены соотношения между размерами кольцевого сопла, относительным разрежением в донной части и длиной циркуляционной зоны. Чем тоньше кольцевая струя (меньше отношение ширины сопла к его диаметру), тем больше донное разрежение и тем короче зона (минимальная длина зоны — около двух диаметров сопла). Там же показано, что вдув в зону снижает разрежение и удлиняет ее. Напротив, отсос из зоны приведет к усилению разрежения и ее укорочению.

Для сильно закрученных струй на участке с рециркуляционной зоной неизвестны даже приближенные решения. Сделать сколько-нибудь непротиворечивые расчетные оценки геометрии и кинематики циркуляционной зоны в закрученной струе интегральными методами невозможно из-за сильной пространственной неизобаричности течения [12]. Поэтому на данном этапе обобщенная структура сильно закрученных турбулентных струй опирается на экспериментальные данные [9, 12].

Можно попытаться дать оценку длины зоны в закрученной струе с обратными токами, исходя из общих представлений о диссипации энергии в развитом турбулентном течении [13]. Рассматриваемые струи являются турбулентными, и диссипация энергии происходит во всем объеме струи. В рециркуляционной зоне, предположительно, сосредоточена основная часть диссипации. Ее мощность  $N_{p3}$  (Вт) оценим как произведение разрежения  $\Delta P_0$  на расход в рециркуляционной зоне, т. е. расход обратных токов  $V_{обр}$ . Объемную плотность диссипации, исходя из характерных величин задачи, определим через тангенциальную скорость на выходе из сопла и размер сопла  $\varepsilon \sim \rho w_0^3 / D_0$  (Вт/м<sup>3</sup>). Объем зоны диссипации, т. е. объем рециркуляционной зоны будет пропорционален

$$\Omega_{p3} \sim N_{p3} / \varepsilon \sim \Delta P_0 V_{обр} / (\rho w_0^3 / D_0). \quad (1)$$

При характерном поперечном размере  $D_0$  характерная длина зоны диссипации (рециркуляционной зоны)

$$L_{p3} \sim \Omega_{p3} / (\pi D_0^2 / 4) \sim \Delta P_0 V_{обр} / (\rho w_0^3 / D_0) / (\pi D_0^2 / 4)$$

или, опуская лишние константы и переходя к безразмерным величинам,

$$\bar{L}_{p3} = L_{p3} / D_0 \sim \Delta \bar{P}_0 \bar{V}_{обр} / \bar{w}_0^3, \quad (2)$$

где  $\Delta\bar{P}_o = \Delta P_o / (\rho u_o^2/2)$ ;  $\bar{V}_{обр} = V_{обр}/V_o$ ;  $\bar{w}_o = w_o/u_o$ ;  $u_o$  — осевая скорость струи на выходе из сопла;  $V_o$  — объемный расход струи на выходе из сопла. Поскольку  $\Delta\bar{P}_o \sim \bar{w}_o^2$ , а  $\bar{V}_{обр} \sim \Delta\bar{P}_o \sim \bar{w}_o^2$ , то из (2) следует

$$\bar{L}_{рз} \sim \bar{w}_o. \quad (3)$$

Согласно [12], обобщенные опытные данные показывают, что максимальная разность давлений (разрежение) в начале зоны квадратично растет с круткой

$$\Delta\bar{p}_o = 1,90 \bar{w}_o^2, \quad (4)$$

а длина зоны обратных токов пропорциональна параметру крутки

$$L^o \approx 4\bar{w}_o. \quad (5)$$

Здесь  $L^o = L/R$ ,  $\bar{w}_o = w_{mo}/u_o$  — характерный параметр крутки;  $\Delta\bar{p}_o = (p_\infty - p_o)/0,5\rho u_o^2$ ;  $R$  — радиус сопла;  $w_{mo}$  — максимальная тангенциальная скорость в выходном сечении сопла;  $u_o$  — средняя по сечению сопла осевая скорость;  $p_\infty$  — давление в пространстве вокруг струи. Следует оговориться, что данные [12] относятся к сплошным (не кольцевым) струям. При формировании сплошных струй за закручивающим устройством возникает сильная неравномерность тангенциальной скорости по радиусу. Поэтому параметр крутки определяется по максимальной скорости  $w_{mo}$ . Не имея аналогичных данных по кольцевым струям, будем ориентироваться на зависимости (4) и (5), тем более что формирование рециркуляционной зоны внутри сопла делает сплошную струю подобной кольцевой. Как видно, оценка (3) соответствует опытным данным (5).

3. Включение отсасывания потока из области обратных токов рециркуляционной зоны есть переход к формированию **всасывающего факела**.

Отсасывание из зоны обратных токов при сохранении параметра крутки учтем введением поправки в (2):

$$\bar{L}_{рз} \sim \Delta\bar{P}_o (\bar{V}_{обр} - \bar{V}_{вс})/\bar{w}_o^3 = \Delta\bar{P}_o \bar{V}_{обр} (1 - \delta_{вс})/\bar{w}_o^3 \sim \bar{w}_o (1 - \delta_{вс}), \quad (6)$$

где  $\delta_{вс} = V_{вс}/V_{обр}$  — относительная величина расхода отсасываемой жидкости. В (6) предполагается, что при небольших значениях  $\delta_{вс} < 1$  дополнительное разрежение, создаваемое в отсасывающей трубке, по отношению к разрежению крутки не оказывает влияния на величину  $\Delta\bar{P}_o$ . Из (6) следует, что даже незначительное отсасывание будет сокращать длину циркуляционной зоны. В факел будет уходить часть ядра постоянного расхода струи.

4. Представляет интерес оценка изменения длины свободного факела всасывания (без посадки его на стенку — длины зоны диссипации) при значительном увеличении отсасывания с переходом  $\delta_{вс}$  через 1, т. е. с прямым отбором ядра постоянного расхода струи. Это важно для оценки длины интенсивного дистанционного всасывания с посадкой факела на стенку. Как уже было отмечено, при незначительном отсасывании дополнительное разрежение в отсасывающей трубке практически не изменит структуру рециркуляции и не повлияет на разрежение, созданное закруткой струи. Нарастивание отсасывания потребует такого понижения давления в трубке  $\Delta P_{вс} \geq \Delta P_o$ , при котором сформируется активное его воздействие на структуру зоны. В первую очередь понижение давления приведет к увеличению и без того немалого поперечного притока массы к наружной стороне струи. Приток обусловлен пониженным давлением в области оси симметрии зоны [12]. В [15] в терминах эжекции представлены опытные данные по

увеличению расхода закрученной струи (без отсоса из зоны). На длине первых пяти калибров приток массы достигает 4 расходов струи (при величинах закрутки около 2, в прямоточной струе приток массы  $\sim 1$  расход). В действительности эжекция не может быть причиной такого притока массы. Основная диссипация в такой структуре оценивается как

$$\begin{aligned} N_{\text{стр}} &\sim \Delta P_{\text{вс}} [(V_o + V_{\text{прит}} + \Delta V_{\text{прит}}) - V_{\text{вс}}] \sim \\ &\sim \Delta P_o V_o (1 + V_{\text{прит}}/V_o + \Delta V_{\text{прит}}/V_o - V_{\text{вс}}/V_o). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $V_{\text{прит}}$  — приток к струе на длине зоны, обусловленный действием разрежения  $\Delta P_o$ ,  $\Delta V_{\text{прит}}$  — приращение притока к струе на длине зоны, обусловленное действием дополнительного разрежения, создаваемого всасывающим патрубком  $\Delta P_{\text{вс}}$ . Принято  $\Delta P_{\text{вс}} \sim \Delta P_o \sim \bar{w}_o^2$ .

По аналогии с (6) получим оценку длины структуры

$$\bar{L}_{\text{стр}} \sim \bar{w}_o (1 + \delta_{\text{прит}} + \delta'_{\text{прит}} - \delta'_{\text{вс}}), \quad (8)$$

где  $\delta_{\text{прит}} = V_{\text{прит}}/V_o$ ;  $\delta'_{\text{прит}} = \Delta V_{\text{прит}}/V_o$ ;  $\delta'_{\text{вс}} = V_{\text{вс}}/V_o$ . Из (8) видно, что усиление крутки удерживает и удлиняет структуру деформированного всасывающего факела. Усиление всасывания приводит к двум противоположно направленным действиям: ее деградации и укорочению через  $\delta'_{\text{вс}}$  и удлинению через поперечный приток массы  $\delta'_{\text{прит}}$ . Понятно, что при сильном отсасывании в патрубок начнет уходить весь расход обратных токов, т. е. установится равенство  $V_{\text{вс}} = V_{\text{обр}}$ . Дальнейшее усиление отсасывания приведет к  $V_{\text{вс}} = V_o$ , или  $\delta'_{\text{вс}} = 1$ , однако и в этом случае длина структуры останется конечного размера. На данном этапе нет возможности оценить увеличение слагаемого  $\delta'_{\text{прит}}$  с усилением отсасывания и ростом разрежения. Однако, исходя из оценки величины  $\delta_{\text{прит}}$ , достигающей 4 при естественном разрежении, можно полагать, что слагаемое  $\delta'_{\text{прит}}$  будет больше единицы, а длина факела — не менее двух диаметров сопла. Только когда очень сильное отсасывание полностью захватит ядро постоянного расхода вместе с притекающими массами, собственно, струя с зоной и факелом будет ликвидирована.

Опираясь на (5) и (8), можно предложить приближенную расчетную оценку длины свободного всасывающего факела в виде

$$\bar{L}_{\text{ф}} = L_{\text{ф}}/D_o \approx 2\bar{w}_o (1 + \delta'_{\text{прит}} - \delta'_{\text{вс}}). \quad (9)$$

Здесь в скобках опущено слагаемое  $\delta_{\text{прит}}$ , поскольку его влияние на длину зоны в (5) учитывается величиной коэффициента пропорциональности 4, а в (9) — коэффициентом 2.

Таким образом, вопрос о формировании протяженного, надежного и эффективного всасывающего факела напрямую связан с самоорганизацией максимально удлиненной рециркуляционной зоны.

Применительно к кольцевой струе следует признать, что ее рециркуляционную зону уже нельзя в полной мере отнести к явлениям самоорганизации, поскольку эта структура возникает во многом как организованная вследствие очевидного принуждения геометрической формой кольцевого канала. Тем не менее внутренние связи между характерными параметрами зоны должны оставаться одинаковыми для сплошных и кольцевых струй.

5. Образование рециркуляционной зоны — не единственное явление самоорганизации, определяющее работу устройств с дистанционным всасыванием. Для решения технической задачи, поставленной в патентах [5, 6], — захвата локализованного на поверхности или вблизи нее источника загрязнения и удаления его через всасывающий патрубок —

необходима определенная фиксация всасывающего факела. Это достигается посадкой факела на подстилающую поверхность (стенку, пол).

Взаимодействие вращающегося потока со стенкой в сочетании с инициированным оттоком жидкости от стенки под действием градиента давления, усиленного отсасыванием, формирует стекающие по спиралям к оси симметрии пограничные слои, переносящие завихренность. Когда поток завихренности в отрывающихся от стенки и переходящих в факел масс под действием включенного отсасывания достигает критической величины, скачком возникает концентрированный вихрь вдоль оси симметрии. Вихрь сидит внутри вихревого ядра. **Скачкообразное возникновение вихря (смерчевого типа) и есть еще одно явление самоорганизации макроскопической структуры внутри области обратных токов.** Образование вихря завершает формирование всасывающего факела. Схема закрученной струи из кольцевого сопла с факелом всасывания, посаженным на пол, представлена на рис. 1 в поперечном разрезе. Стрелками указаны осевые составляющие потоков.

Концентрированный вихрь не может образоваться в свободном факеле всасывания, не опирающемся на стенку, поскольку вихревые линии бывают либо замкнутые, либо сидящие на стенке и уходящие в бесконечность (в данном случае во всасывающий патрубок). С другой стороны, вихрь не возникнет в закрученной струе, натекающей на стенку за пределами рециркуляционной зоны, поскольку закрученные пристенные массы под действием прямого струйного движения будут просто растекаться по стенке.

б. Известно, что при турбулентном режиме взаимодействие нисходящей периферийной закрученной струи и восходящего приосевого потока вдоль вихря приводит к появлению крупномасштабной неустойчивости течения в целом и выбросам вредных газов из всасывающего факела в окружающее пространство [9]. Сказанное относится к всасывающему факелу, посаженному на подстилающую поверхность. Объяснение этой неустойчивости, возможно, связано с пульсацией потока в рециркуляционной зоне. Для свободной рециркуляционной зоны с обратным током в закрученной струе в [12] приведена обобщенная по опытным данным зависимость характерной частоты пульсаций скорости вблизи среза цилиндрической центробежной форсунки

$$Sh = f_1 D_o / u_o \approx 0,7 \bar{w}_o.$$

Неустойчивость течения по [12] вызывается тем, что с обратным током в форсунку попадает поток момента количества движения. Этим включается положительная обратная связь: случайное усиление (ослабление) обратного тока приводит к интенсификации (угасанию) закрутки струи, что, в свою очередь, усиливает (ослабляет) обратный ток. Ограничением этого процесса является перестройка потока внутри форсунки.

Однако данное объяснение не применимо в полной мере к кольцевым закрученным струям, поскольку у них обратное течение не взаимодействует напрямую с форсункой. Лишь разворот обратных токов возле среза сопла в прямом направлении может внести в основную струю поток момента импульса, правда, сильно ослабленный. Кроме того, отсасывание выведет большую часть потока момента импульса обратных токов за пределы структуры. Таким образом, при наличии отсасывания в кольцевой закрученной струе неустойчивость структуры можно отнести к типичной неустойчивости смерчевого вихря [14].

Технические решения [5, 6] направлены, в том числе, на преодоление неустойчивости структуры разнесением в пространстве нисходящей струи и факела всасывания. Так, диаметр нисходящей кольцевой струи по [5, 6] должен быть не менее пяти диаметров всасывающего патрубка. Предполагается, что дистанционирование приточной закрученной струи и центрального вихревого ядра со смерчевым вихрем избавит всасывающий факел от разрушительных выбросов.

В дополнение к сказанному, информация о дистанционировании потоков объясняет заявленные в [5, 6] достижимые длины факела в десятки диаметров всасывающего патрубка. Если, к примеру, длина зоны в кольцевой струе по [5, 6] составляет три диаметра сопла, то длина всасывающего факела будет не менее пятнадцати диаметров патрубка всасывания.

7. Упомянутые устройства дистанционного всасывания [4–8] и многие другие имеют одинаковое по смыслу назначение: дистанционный аэродинамический захват и удаление загрязнений, локализация и удаление выделяющихся в технологическом процессе вредных веществ, бесконтактный отбор воздушных проб с твердых поверхностей и подача их в аналитический тракт приборов газового анализа для обнаружения следов взрывчатых, наркотических и прочих опасных веществ, а также для проветривания замкнутых помещений.

Следует отметить, что свободный (не посаженный на стенку) факел всасывания может использоваться для удаления загрязненных объемов воздуха, плавающих в неограниченном пространстве. Эффективное удаление загрязнений, локализованных на стенке или вблизи ее поверхности, обеспечивается лишь посадкой факела всасывания на стенку с образованием концентрированного вихря. Согласно [6], *область захвата на стенке оценивается в 3–4 диаметра всасывающего патрубка.*

Математическое моделирование закрученных струйных течений подтвердило сделанные оценки не только качественно, но и, с некоторым приближением, количественно [16–18].

8. Может оказаться перспективным использование дистанционного всасывания в воздушно-тепловых завесах смесительного типа для защиты входных дверей зданий. Функциональное назначение смесительных завес — интенсивное перемешивание беспрепятственно втекающего в открывающиеся двери холодного наружного воздуха с подогретым в завесе внутренним воздухом с целью доведения температуры смешения до заданной величины. Все современные завесы работают по разомкнутому циклу движения воздушных масс. Верхние завесы всасывают воздух из верхней части вестибюля или тамбура и отправляют нагретые струи к полу, где последние встречаются с холодными массами и перемешивают их. Смесь частично (с расходом, равным расходу втекающего наружного воздуха) уходит через вестибюль или тамбур в помещения здания. Остальная часть смеси участвует в циркуляции в пространстве вестибюля или тамбура, заполняет его и всасывается завесой.

Завеса, подающая сверху вниз приточную кольцевую закрученную струю с факелом всасывания внутри струи, принципиально, может сформировать замкнутый цикл циркуляции с локализацией перемешанных объемов вблизи входных дверей (без заполнения смесью всего пространства вестибюля). Локализация перемешивания позволит удерживать расчетную внутреннюю температуру в значительной части вестибюля. В целом оба типа завес одинаково эффективны в плане смесительной защиты.

9. Различие между замкнутым и разомкнутым циклом циркуляции выявляется в условиях эпидемических ситуаций, когда с потоком людей, проходящих через двери, в помещение попадают патогенные микроорганизмы и вирусы. Омывая проходящих через двери людей, в разомкнутом цикле поток воздуха уносит аэрозольную насыщенную патогенами фазу, образующуюся при дыхании, кашле, чихании и разговоре. После воздействия струи завесы часть смеси проходит из тамбура или вестибюля внутрь помещения. Остальные массы циркулируют в тамбуре или вестибюле через завесу. Многократная рециркуляция масс, снова и снова контактирующих с потоком людей, повышает концентрацию патогенов в воздухе вестибюля. Поэтому поток воздуха, проходящий далее внутрь здания, будет нести более высокий риск заражения присутствующих и посещающих людей. В зимнее время в открывающуюся дверь втекает наружный «чистый» воздух, разбавляя смесь. В летнее время в жару, если завеса работает

для обдува людей, наружный воздух не разбавляет концентрацию патогенов в смеси, чем положение усугубляется.

Для решения этой проблемы АО «НПО «Тепломаш» предложена завеса традиционной конструкции, в которой воздух, всасываемый вентилятором, обеззараживают, в частности, подвергают воздействию ультрафиолетовых лучей (УФИ) [19]. Омывая проходящих через двери людей, поток воздуха уносит вместе с выдыхаемым аэрозолем патогенные микроорганизмы и вирусы. Струя чистого воздуха понижает концентрацию патогенов в аэрозоле. Многократное воздействие УФИ на циркулирующие массы повышает степень обеззараживания. Поэтому поток воздуха, проходящий через тамбур или вестибюль внутрь здания, становится более очищенным от патогенных микроорганизмов и вирусов (с более низкой их концентрацией).

Тем не менее в разомкнутом цикле обеззараживания воздуха защитная струя уносит патогенные микроорганизмы и вирусы вместе с выдыхаемым аэрозолем. Зараженные токи воздуха, иницированные завесой, прежде чем они снова пройдут через завесу и подвергнутся воздействию УФИ, разносят капельки аэрозоля с вирусом по всему пространству, хотя и в меньшей концентрации.

В замкнутом цикле обеззараживания при попадании в границы кольцевой струи зоны постоянного воспроизведения заражения чередой проходящих через тамбур людей происходят следующие процессы. Ядро постоянного расхода струи с патогенами, достигнув области захвата на полу, уходит через факел всасывания (следствие сбалансированного по расходу замкнутого цикла) в завесу на обеззараживание. Приточные массы струи, также несущие зараженный аэрозоль, закручиваются, опускаются к полу и будут отделяться от струи, растекаясь вдоль пола. Таким образом, некоторая часть (периферийная) аэрозоля в постепенно разбавляющейся концентрации останется в результирующей смеси и пройдет с транзитным потоком в помещение. Если диаметр кольцевой струи одного порядка с длиной пути проходящих людей, то объем остаточного аэрозоля в низкой концентрации будет незначителен. Более детальное рассмотрение взаимодействия втекающего потока с кольцевой струей внесет свои коррективы в аэродинамическую картину, однако при примерном равенстве (еще лучше — превосходстве) диаметра струи и поперечного размера открытой части проема, а также при достаточной закрутке струи ее деформация не должна быть значительной.

10. Можно значительно повысить эффективность очистки зоны заражения, если распространить захват в придонной области факела всасывания не только на ядро постоянного расхода, но и на все приточные массы. Это гарантирует удаление из зоны заражения всего аэрозоля, попадающего в границы струи.

Такое расширение компонентов всасывания возможно при отмене условия равенства расходов на всасывании и в кольцевой струе, и переходе *к схеме с дисбалансом расхода*. По этой схеме после повышения давления поступающего от факела обеззараженного в завесе потока часть расхода, превышающая расход в кольцевой струе, должна быть отделена и выведена за пределы структуры (внутри вестибюля). При этом формирование закрутки кольцевой струи должно обеспечивать поддержание факела с расширенным всасыванием. При этом следует учитывать, что усиление отсасывания укорачивает длину всасывающего факела. Платой за реализацию схемы с дисбалансом расходов при сохранении параметров закрученной струи будет значительное увеличение производительности, давления и мощности вентилятора (возможно, даже замены типа вентилятора). Однако в условиях эпидемий это невысокая цена.

## **Выводы**

1. Дистанционное всасывание — реальная аэродинамическая структура.
2. Использование дистанционного всасывания в качестве местной вытяжной вентиляции — перспективное направление.

3. Совмещение дистанционного всасывания с воздушными завесами над открытыми дверями создаст эффективную защиту от патогенных микроорганизмов в эпидемиологических ситуациях.
4. Необходимы направленные экспериментальные исследования структуры дистанционного всасывания.

## Литература

1. Позин Г. М. Местная вытяжная вентиляция — самый эффективный способ организации воздухообмена в помещении // СОК, № 10, 2006, с. 106–111.
2. Болوماتов В. Н. Местный отсос в системах вентиляции: простые решения // АВОК, № 2, 2018, с. 34–39.
3. Приточно-вытяжное вентиляционное устройство. А.с. № 567035. Подача заявки: 1974.12.04. Опубликовано: 1977.07.30.
4. Способ локальной вытяжной вентиляции и устройство для его осуществления. Патент RU 2046258. Подача заявки: 1992.06.30. Опубликовано: 1995.10.20.
5. Устройство для очистки воздуха. Патент RU 2354891. Подача заявки: 2007.11.08. Опубликовано: 2009.05.10.
6. Способ локальной вытяжной вентиляции и устройство для его осуществления. Патент RU 2428635. Подача заявки: 2009.12.08. Опубликовано: 2011.09.10.
7. Устройство для дистанционного отбора воздушной пробы для приборов газового анализа (варианты). Патент RU 2625821. Подача заявки: 2015.06.02. Опубликовано: 2017.07.19.
8. Жигарев В. А., Минаков А. В. Расчетно-экспериментальное исследование системы газоудаления на примере веерного отсоса // Тезисы докладов 5-й международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика закрученных потоков». Россия, Казань, 19–22 октября 2015 г.
9. Гупта А. и др. Закрученные потоки: Пер. с англ. / Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. — М.: Мир, 1987.
10. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994. — 236 с.
11. Марр Ю. Н. Явления самоорганизации в инженерных системах зданий // Инженерные системы — АВОК Северо-Запад. № 1. 2021. С. 10–17.
12. Теория турбулентных струй / Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Г. Н. Абрамовича. — М.: Наука. 1984. 720 с.
13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1988. — 733 с.
14. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Москва-Ижевск. Институт компьютерных исследований. 2005. — 504 с.
15. Аэродинамика закрученной струи. Под ред. Р. Б. Ахмедова. М.: «Энергия», 1977. 240 с.
16. Грицкевич М. С. Численное исследование пылевоздушного течения вблизи круглого отсоса, экранированного кольцевой закрученной струей. Часть 1. Воздушно-струйные течения / М. С. Грицкевич, К. И. Логачев, О. А. Аверкова, В. А. Ткаченко // Новые огнеупоры. — 2018. — № 8. — С. 66–69.
17. Грицкевич М. С. Численное исследование пылевоздушного течения вблизи круглого отсоса, экранированного кольцевой закрученной струей. Часть 2. Динамика пылевых частиц / М. С. Грицкевич, К. И. Логачев, О. А. Аверкова, В. А. Ткаченко // Новые огнеупоры. — 2018. — № 10. — С. 74–77.
18. Ткаченко В. А. Совершенствование систем местной обеспыливающей вентиляции за счет создания и использования закрученных воздушных потоков. Автореферат диссертации ... канд. техн. наук. Белгород, 2021.

19. Воздушная завеса. Патент на полезную модель № 201680. Подача заявки: 20.08.2020.