

## ЯВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ ЗДАНИЙ

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

*Инженерная практика демонстрирует разнообразные эффекты самоорганизации, которые зачастую не воспринимаются как таковые, становятся помехой в технических решениях и превращаются в источники непредусмотренных потерь. В аппаратуре инженерных систем и в самих помещениях нередко возникают такие явления, как отрывные течения, циркуляционные зоны, прилипание струй к ограждениям, автоколебания и пр. Усилия, часто безуспешные, направляются на их прямое подавление вместо осознания неизбежности и освоения того или иного явления.*

В отдельных случаях самоорганизация играет положительную роль. Так, колесо радиального вентилятора с лопатками, загнутыми вперед, демонстрирует неожиданное упорядочение течения и многократный рост характеристик при переходе из свободного состояния в спиральный корпус [1].

Показано, как одно и то же явление самоорганизации в разных технических ситуациях может быть конструктивным и деструктивным. В последнем случае стараются найти нетривиальное решение проблемы.

1. Явления самоорганизации изучаются синергетикой [2]. Синергетика делает четкое различие между процессами **организации** структур и **самоорганизации**. Под организацией понимается принудительное детерминированное выстраивание структуры переноса субстанций (вещества, массы, импульса, энергии) в открытой неравновесной системе, которая в силу незначительной удаленности от равновесия может считаться квазиравновесной. Когда удаление от равновесия достигает критической величины, случайные возмущения перестают рассасываться. Происходит их нелинейный рост, приводящий к деформации и разрушению монотонной потоковой структуры. На ее месте **самопроизвольно** возникает новый вид порядка, обеспечивающий перенос субстанций с потоками более высокой плотности. Перестройка совершается за счет внутренних стимулов сложной нелинейной системы и обозначается термином **самоорганизация**. Примерами могут служить в теплопереносе — ячейки Бенара, в гидродинамике — вихри Тейлора, дорожки Кармана, в химии — реакции Белоусова — Жаботинского, процессы в лазерах, тепловые режимы с обострением.

2. Широко распространенные случаи самоорганизации в инженерных системах связаны с движением жидкостей, в частности, с ситуациями, которые порождают высокий поперечный градиент скорости, тонкий свободный сдвиговый слой. В идеальной жидкости такие течения отображаются поверхностями разрыва тангенциальной скорости или идеальными вихревыми слоями. В реальных течениях — это оторвавшиеся от обтекаемого тела или уступа сдвиговые слои или слои смещения на начальном участке затопленной струи. Особое значение имеют течения с вихревыми слоями противоположных знаков завихренности или, например, направленные навстречу друг другу струи.

Диапазон таких явлений необычайно широк: от огромных пульсирующих вихревых зон за высокими зданиями в потоке ветра до множества мелких циркуляционных зон за трубками поперечно обтекаемого теплообменного пучка. Сюда попадают обдуваемые провода линий электропередачи, телевизионные башни, дымовые трубы, омываемые водой опоры (быки) мостов, отрывные зоны за автомобилями и бегущими спортсменами.

Взаимодействие встречных воздушных потоков давно интересовало ученых, поскольку оно лежит в основе возникновения местных ураганов ветров (боры). Исследования

показали, что взаимодействие может носить колебательный характер. В инженерных системах сталкивающиеся струи используются в воздухораспределителях динамического типа «генератор комфорта» [10–12], а также при защите открытых проемов двусторонними боковыми завесами [13].

3. Мгновенное движение в следе за телом имеет вид шахматной вихревой дорожки. Осреднение во времени создает замкнутые циркуляционные зоны и специфическую эпюру осредненной скорости позади тела, отражающую потерю (рассеяние) импульса. Обтекаемое тело, оказывая силовое воздействие на поток, вносит в него возмущение в виде дефицита импульса, который должен быть возмещен окружающей обтекающей жидкостью. В неограниченных потоках рассеяние локализованных возмущений оставляет только след, в каналах рассеяние приводит к потере давления.

*В ближнем следе непосредственно за телом совершается последовательное сворачивание стекающих с тела вихревых слоев. Созревший и выходящий на дорожку вихрь посылает информацию вверх по потоку о необходимости формирования новой структуры для зарождения и созревания вихря с противоположной стороны тела. Область действия этого важнейшего механизма оценивается в 4–5 диаметров от задней стороны цилиндра. Размещение на оси следа за цилиндром тонкой разделительной пластины длиной 5 диаметров прекращает сворачивание вихревых слоев и образование дорожки [3].*

*Все характерные области течения на цилиндре совершают взаимообусловленные колебания с частотой Струхаля [4]: лобовая и кормовая критические точки перемещаются в диапазоне углов  $^{\circ} - 6^{\circ}$  и  $^{\circ} - 165^{\circ}$  соответственно, точки отрыва пограничного слоя в диапазоне  $^{\circ} - (80 - 105)^{\circ}$ , лобовая и кормовая точки движутся всегда навстречу друг другу, точки отрыва – в одинаковом направлении, а лобовая критическая точка и точки отрыва — во взаимно противоположном направлении. В [5] показано, что в стекающей от точки отрыва вихревой пелене один раз за период появляется концентрированное вихревое возмущение, инициирующее сворачивание вихревого слоя. Его зарождение в момент начала движения точки отрыва вверх по потоку формирует вихрь и создает на цилиндре циркуляцию противоположного знака. При этом лобовая критическая точка смещается навстречу рассматриваемой точке отрыва, кормовая следует за точкой отрыва, а подъемная сила меняет направление в сторону, противоположную той, от которой развивается вихрь.*

*Именно в силу возникновения новой, сложнее упорядоченной структуры существует наиболее устойчивая конфигурация дорожки (с характерным отношением поперечного расстояния между вихрями к продольному), которая, согласно принципу Кронауэра, обеспечивает минимум силового воздействия тела на жидкость [6]. Использование этого принципа позволило автору [6] ввести обобщенное число Струхаля для самых разных плохо обтекаемых тел, включая случаи интерференции в следе от донного вдува или разделительной пластины. Это число оказалось равным  $Sh_B = 0,181$  в широком диапазоне параметра донного давления  $K = 1,1 - 1,45$  и числа Рейнольдса, охватывающего закритические режимы ( $Re = 2 \cdot 10^6 - 10^7$ ). Обобщение можно считать надежным подтверждением принципа Кронауэра. А выбор единственной конфигурации, обеспечивающей минимальное силовое воздействие для заданного параметра донного давления, есть важнейший аспект самоорганизации.*

С отрывом потока и возникающими циркуляционными зонами прочно связано представление о гидродинамическом сопротивлении, о потере давления в каналах с местными сопротивлениями. Учет и компенсация потерь нередко становятся трудно преодолимой технической проблемой. Однако дело не только в этом. Периодический отрыв вихрей от тела приводит к периодическим изменениям продольной и поперечной

составляющей аэродинамической силы, действующей на тело. Упругие колебания тела могут попасть в резонанс с частотой Струхалия. Это переводит самоорганизацию в сугубо инженерную плоскость и требует от конструкторов и проектантов учета устойчивости и прочности оборудования и строительных конструкций.

Даже в таких стесненных системах как поперечно обтекаемые пучки труб теплообменников не прекращается периодическое вихреобразование. Согласно [7], число Струхалия зависит от шахматной, или коридорной, компоновки труб и относительных шагов. Плотная компоновка пучков не допускает образования вихревых дорожек — периодический процесс фактически сводится к деформации вихревых зон за трубками и пульсациям давления на поверхности трубок. Вибрация труб может накладывать ограничения по скорости потока в минимальном сечении пучка во избежание попадания труб в резонанс со струхалиевой частотой.

Вместе с тем пульсация потока в межтрубном пространстве оказывает существенно положительное влияние на интенсификацию теплоотдачи в поперечно обтекаемых пучках. Известно, что теплоотдача первого ряда трубного пучка составляет всего 60% от теплоотдачи глубинного ряда, поскольку турбулизация набегающего потока всегда заметно меньше, чем в глубине пучка. Во втором ряду турбулизация нарастает — теплоотдача поднимается до 70%. И только начиная с третьего ряда теплоотдача выравнивается до 100%. Из этого следует, что для двухрядных пучков, чаще всего используемых в воздухонагревателях воздушных завес, теплоотдача не превышает 70% от возможной.

Имеются примеры и полезного применения циркуляционных зон. Так, ряд плохо обтекаемых тел в потоке широко используется для стабилизации пламени в камерах сгорания турбореактивных двигателей. Положительный эффект основан на возвратном движении в следе горящего топлива.

Интересно, что тенденция преодоления сопротивления движущимися телами у живых организмов получила уникальное развитие. Совмещение направленного движения с периодическими поперечными движениями вспомогательных частей тела привело к новой форме самоорганизации. Появились крылья, размахивая которыми удалось формировать обращенные шахматные дорожки вихрей. Вместо дефицита импульса в дорожках Кармана обращенные дорожки создали избыток импульса, т. е. тягу [8].

4. Взаимодействие *двух встречных затопленных плоских струй* демонстрирует характерный эффект самоорганизации, выражающийся в периодическом развороте струй в противоположные стороны [9]. В отличие от предыдущего, струи вносят возмущение не в виде дефицита импульса, а в виде его избытка. При относительно небольшом избытке импульса возможно появление симметричной картины растекания сталкивающихся струй. Однако такое течение быстро теряет устойчивость. Развивается автоколебательный режим, при котором струи целиком периодически заворачивают в противоположные стороны, как показано на **рис. 1**.

Взаимодействие сталкивающихся струй нашло свое использование в *воздухораспределителях динамического типа «генератор комфорта»* [10–12]. Это устройство представляет собой прямоугольное отверстие в стенке, перекрытое аркой. При подаче воздуха к арке возникают два соосно направленных навстречу друг другу потока, которые соударяются, поворачивают на  $90^0$  и выходят через прямоугольное отверстие в помещение. Физические эксперименты и численное моделирование показали, что в отличие от классического симметричного лобового соударения потоков или струй под аркой развивается автоколебательный режим с попеременным выходом масс через прямоугольное отверстие от левого и правого потоков. Как результат, истекающая в помещение струя совершает колебания значительной амплитуды в плоскости подачи потоков и распадается на чередующиеся трехмерные вихревые структуры. При распадении начальных вихрей на все более мелкие происходит эффективное снижение

скорости подаваемого в помещение воздушного потока, расширение области пространства аэрации и улучшения перемешивания воздуха в этом пространстве.

При относительно небольших потоках импульса рассмотренные системы остаются стационарными и симметричными диссипативными потоковыми структурами. Однако имеются две особенности. Во-первых, струйные течения практически не бывают ламинарными из-за быстрой потери устойчивости. Поэтому в отличие от классических диссипативных систем [2] в струйных системах участвует не только движение микроуровня (молекулярная вязкость, теплопроводность), но и макроскопические движения: конвекция, естественная турбулентность, крупномасштабные структуры. Во-вторых, если в пристенных (канальных) течениях с сохраняющимся расходом импульс снижается за счет его переноса через пограничные слои (толщина потери импульса), то в струйных системах поток импульса струи остается неизменным по длине, тогда как расход наращивается за счет эжекции. Таким образом, диссипативный механизм пристенного течения заключается в тривиальной потере импульса при трении движущихся масс о стенку. В струйных же движениях импульс затрачивается на вовлечение в движение прилегающих к струе масс (эжекцию) и **диссипативность может быть интерпретирована как переход импульса от ядра постоянного расхода струи к эжектированным массам.**

*Если говорить о заданной целенаправленности системы на рассеяние импульса, то эжекция струи есть основной механизм реализации такой целенаправленности. Многочисленные экспериментальные исследования струй (см. ссылки в [15]) показали, что за осредненной картиной турбулентных струй стоит не только классическое турбулентное перемешивание, но и такие явления, как когерентные структуры в основном участке струи, поперечные колебания плоской струи с характерной частотой  $fd/u_m \approx 0,11$ , амплитудой  $\Delta\delta/\delta \approx 0,2$  и конвективной скоростью  $u_c/u_m \approx 0,57 - 0,75$ . Возникновение когерентных структур в струйных течениях не является результатом принуждения элементами системы. Оно обусловлено гидродинамической неустойчивостью и может считаться как минимум предтечей самоорганизации. Результаты численного моделирования затопленной плоской струи [15] показывают, что чем дальше от места истечения, тем сильнее расплываются когерентные структуры. Струя буквально разрушается, рассеивая поток импульса в пространстве.*

5. Чтобы дать объяснение переходу от симметричной структуры к периодическим заворотам встречных струй по [9], примем следующее:

- **переносимая субстанция** — импульс затопленной струи, истекающей из сопла — источника импульса;
- **сток импульса** — пространство, в котором происходит рассеяние импульса;
- **процесс переноса субстанции** — конвективный, вместе с ядром постоянного расхода струи и эжектированными массами;
- **заданная целенаправленность системы** — ликвидация возмущения среды — рассеяние избыточного импульса в пространстве;
- **конвективное сопротивление переносу (рассеянию) субстанции** — неподвижная окружающая жидкость, а также любое механическое противодействие, в частности, встречная симметричная струя.

Исходя из симметрии, поперечное растекание встречных струй является напрашивающейся структурой, которая, однако, становится очевидным препятствием для рассеяния импульса. В симметричной структуре возникает напряженное состояние из-за «упругости» искривленных потоков под действием центробежных сил. При этом крупномасштабные вихри в структуре струй готовят разрушение симметричной области взаимодействия. Перемещаясь вниз по потоку, вихри одной струи «бомбардируют»

область разворота встречной струи. Наиболее напряженная область структуры — пятно соприкосновения и растекания струй – подвержено самым сильным возмущениям. Случайный характер возмущений постоянно нарушает симметрию и деформирует пятно растекания. Линии раздела (растекания) потоков отходят от осей симметрии струй и формируют части с неравными расходами. Возникают поперечные колебания растекающихся от места соударения струй. Далее, предположительно, они распадаются на отдельные вихри противоположных знаков. Реконструкция этого этапа опирается на многочисленные физические и численные эксперименты по распаду и перестройке возмущенных вихревых слоев [15, 16].

Появление критически избыточной асимметрии расходов включает положительную обратную связь: нарушенное равновесие моментов инициирует усиление асимметрии расходов непосредственно в пятне взаимодействия и устремление к «проскальзыванию» одной струи по другой. Положительная обратная связь, как нелинейная функциональная особенность системы, усиливает и закрепляет новые признаки возникшей структуры.

Дальнейшее движение может носить импульсный характер взаимной переброски струй без перехода через симметричную структуру растекания: мгновенное прохождение встречного направления с локальным повышением давления в зоне встречи и последующий выброс траекторий в противоположные стороны. Так завершается переход к более упорядоченному механизму интенсивного рассеяния импульса.

Согласно [9], период колебания струй равен  $T = 6L/u_c$ , где  $L$  — расстояние между соплами струй,  $u_c$  — скорость свободной струи на длине  $L/2$ . Если понимать под  $u_c$  среднemasсовую скорость, то, пользуясь обычными расчетными формулами для струй [14], выражение для периода колебаний можно переписать в виде

$$Sh = L/T u_0 = 0,303/\sqrt{\bar{F}}, \quad (1)$$

где  $u_0$  — скорость струи на выходе из сопла,  $\bar{F} = LH/2\delta H = L/2\delta$  — параметр, аналогичный отношению площади проема к площади воздуховыпускных отверстий двусторонних боковых завес [14],  $H$  — размах сопла,  $\delta$  — ширина сопла. В отличие от [12] в выражении (1) принят коэффициент качества струи  $\zeta = 1$ .

6. В столкновении струй над прямоугольным отверстием, перекрытым аркой (в «генераторе комфорта»), в физическом эксперименте исследован автоколебательный режим [10–12], в котором реализуется максимально интенсивное рассеяние импульса в когерентных структурах с быстрым падением скоростей растекающихся воздушных потоков и идеальным выравниванием температуры. При достаточно малом начальном импульсе затекающих под арку струй и, соответственно, при малом расходе воздуха возникло бы стационарное симметричное слабо взаимодействующее вытекание струй в прямоугольное отверстие. Его нельзя путать с искусственно созданной при численном моделировании стационарной симметричной структурой (рис. 3.7 в [12]).

Реальное периодическое течение имеет место не только на выходе из прямоугольного отверстия, но и под аркой, и на входе в арку, и вокруг арки (рис. 3.3 в [12]). В целом все движения жидкости приблизительно соответствуют поперечному обтеканию, например, пластины, за которой образуется шахматная вихревая дорожка. Вокруг арки формируется переменная циркуляция, порождающая на выходе из отверстия вихри противоположных знаков и управляемая обратной связью (т. е. информацией) от формирующейся вихревой дорожки. Несмотря на то, что вихри быстро размываются и дорожка как таковая не наблюдается, просматривается очевидная аналогия с обтекаемым цилиндром (см. п. 3).

7. Шиберующая защита проема двусторонней боковой завесой до некоторой степени аналогична воздухораспределителю «генератор комфорта». Роль арки играет противодействующая разность давлений в проеме. Направленные навстречу друг другу

(или под некоторым углом) плоские струи — аналоги потоков, втекающих с двух сторон под арку. Открытый проем — аналог прямоугольного отверстия, через которое взаимодействующие струи вытекают в помещение. Различие только в том, что в защитной структуре проема часть воздушных масс может уходить наружу и наоборот, а в воздухораспределителе арка не допускает этого.

Под действием разности давлений струи завес заворачивают в проем. В зависимости от соотношения ширины проема, разности давлений и потока импульса струй могут сложиться три схемы течения:

- а) струи затекают в проем, не соприкасаясь друг с другом, между ними в проем втекает наружный воздух (проем не защищен);
- б) струи затекают полностью, соприкасаясь без взаимодействия, наружный воздух не проходит между ними — реализуется так называемый предельный режим защиты [14];
- в) струи затекают взаимодействуя — это форсированный режим, при котором часть струйных масс, эжектированных наружными сторонами струй, отделяется и уходит на улицу.

В форсированном режиме наблюдаются автоколебательные движения струй [13], что также относится к явлениям самоорганизации. Число Струхала по экспериментально определенному периоду составляет  $Sh = L/(u_0 T) = 0,046$  для показателя защиты  $q = 0,78$  и отношения площадей проема и воздуховыпускных отверстий завесы  $\bar{F} = 40$ .

**Рис. 2** демонстрирует хорошее совпадение данных по числам Струхала в зависимости от параметра  $\bar{F}$  для всех исследованных объектов:

- расчетных для «генератора комфорта» [12] (для воздухораспределителя  $\bar{F}$  — это отношение площади прямоугольного выпускного отверстия и входных отверстий под арку),
- теоретической оценки для двусторонней боковой завесы [13],
- экспериментальной для двусторонней боковой завесы [13],
- опытных данных для затопленных встречных струй по (1) [9].

Это свидетельствует о внутреннем единстве объектов.

Аналогично «генератору комфорта», в пространстве за струями завесы разворачивается интенсивное рассеяние импульса, сопровождаемое активным перемешиванием масс с различной температурой. Результатом этого становится заполнение пространства воздухом с температурой, приближающейся к температуре смеси. Внутренние стороны струй эжектируют воздух с этой температурой вместо более высокой внутренней температуры. Уже одно это понижает температуру смеси. Но самое главное состоит в том, что в современных модулях завес всасывание воздуха происходит в непосредственной близости от воздуховыпускных отверстий вдоль всего модуля. Через короткое время после раскрытия ворот и включения завесы на всасывание начинает поступать воздух с температурой смеси. Такая положительная обратная связь быстро понижает температуру смеси, если расчетная ее величина была меньше внутренней температуры. Понятно, что **эффект самоорганизации в данном случае играет отрицательную роль**. К сожалению, это обстоятельство не учитывается в проектных расчетах.

С помощью расчетных выражений [14] можно показать, что даже при полной защите проема (показатель защиты  $q = 1$ , относительные потери тепла  $\bar{Q} \approx 0,5$ ) быстро наступит режим, когда температура смеси будет превышать наружную температуру на величину подогрева воздуха в воздухоподогревателях завесы. Иными словами, идеально защищенный в аэродинамическом отношении проем будет выхолаживать помещение потоком смеси с отрицательной температурой. Если же завеса без источника тепла, то температура смеси будет равна наружной.

Возникает вопрос, можно ли что-нибудь сделать для исправления ситуации, исключая замену боковой завесы на верхнюю? Имеются тривиальные способы. Во-первых, возможно дорогостоящее повышение тепловой мощности завес до уровня,

обеспечивающего поддержание температуры смеси, равной внутренней температуре помещения на весь период открытых ворот. Во-вторых, отдельная тепловая и аэродинамическая защита позволит сэкономить до 50% тепловой мощности при полной защите ( $q = 1$ ) и доведении температуры смеси до внутренней [14]. Для этого следует защищать проем холодными завесами, а тепловую компенсацию смесительного типа организовать отдельными воздухонагревателями, заполняя нагретым воздухом пространство за областью взаимодействия встречных струй. В-третьих, устройство интенсивного вдува теплого воздуха из верхней части помещения в пространство за областью взаимодействия обеспечит поддержание на некоторое время более высокой температуры смеси.

**8. Существует и нетривиальное решение проблемы** — использование предельного режима, при котором, как было сказано, струи полностью затекают в проем, соприкасаясь вдоль плоскости симметрии, но без взаимодействия друг с другом. Представления о предельном режиме ошибочно связаны с недостаточным уровнем аэродинамической защиты проема. Чаще всего ограниченность расхода воздуха в сочетании со значительной гидравлической длиной струй способствует обильному затеканию в проем эжектированных снаружи масс, а это понижает показатель защиты — параметр  $q$  — в конце концов до предельного уровня.

В [14] на примере верхней завесы показано (раздел 2-3), что предельный режим определяется не расходом воздуха, а характерным предельным потоком импульса струй, при котором принципиально возможны все режимы защиты от полной ( $q = 1$ ) до отсутствия защиты. При этом все режимы остаются предельными, т. е. струя верхней завесы целиком заворачивает в проем, касается пола, а между струей и полом отсутствует протекание неэжектированных наружных масс внутрь помещения. В [14] дано объяснение того, что совмещение режимов полной защиты и предельного ( $q = q^* = 1$ ) не является противоречивым в рамках принятой модели.

Полученные в [14] результаты для верхней завесы в проеме 4x4 м легко распространяются на боковую завесу поворотом схемы защиты на  $90^\circ$  и заменой пола (верхней завесы) вертикальной плоскостью симметрии проема при двусторонней защите. При этом схема верхней завесы работает на половине ширины нового проема, имеющего ширину 8 м (от сопел теперь уже боковой завесы до плоскости симметрии проема). Для иллюстрации воспроизведем частично табл. 2.1 из [14] как результат расчета предельных режимов верхней завесы при защите проема 4x4 м холодной завесой с  $t_1 = -40^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 15^\circ\text{C}$ , ветром 5 м/с,  $\Delta P_{\text{пр}} = 8,9$  Па,  $\alpha = 30^\circ$ , предельным потоком импульса завесы  $I_3^* = 94,9$  Н (см. табл. 1).

Таблица 1. Параметры завесы в предельном режиме при  $I_3^* = 94,9$  Н

Скорость в сопле, м/с	25	20	15	10	5	4
Параметр $\bar{F}$	129,0	81,6	46,5	20,6	5,1	3,3
Коэффициент эжекции $\lambda^*$	6,74	5,39	4,04	2,69	1,35	1,08
Показатель защиты $q^*$	0,26	0,31	0,40	0,54	0,85	0,96
Ширина сопла $b_3$ , м	0,031	0,049	0,086	0,194	0,778	1,22
Расход завесы $G_3$ , кг/час	13615	17220	22660	34080	68340	85730
Температура смеси $t_{\text{см}}$ , $^\circ\text{C}$	-8,4	-7,4	-5,7	-2,7	+7,8	+13,0
Ширина втекающего потока смеси $b_{\text{см}}$ , м	1,41	1,42	1,41	1,40	1,42	1,42

В табл. 1 прослеживаются характерные тенденции вариации завесы при постоянном потоке импульса (в данном случае предельном). Уменьшение скорости в сопле гидравлически укорачивает струю (убывание  $\bar{F}$ ) с одновременным ее утолщением. Как

следствие, падение коэффициента эжекции приводит к росту показателя защиты  $q^*$ , в пределе до единицы. Последний столбец табл. 1 наиболее ярко иллюстрирует эту тенденцию. Поскольку в предельном режиме потери теплоты с уходящими наружу массами отсутствуют, температура смеси определяется исключительно вносимым струей холодным эжектированным снаружи воздухом, т. е. показателем защиты  $q^*$ . С ростом  $q^*$  растет температура смеси.

Последняя строка таблицы иллюстрирует постоянство ширины втекающего потока смеси (по среднемассовой скорости) во всем диапазоне предельных режимов. Она не превышает 36% от полуширины проема (от 4 м). Понятно, что в отсутствие взаимодействия боковых струй поток смеси затекает в помещение, не перемешиваясь с окружающим воздухом. Поэтому не только на всасывание в завесы поступает воздух с внутренней температурой, но и на внутреннюю эжекцию. Этим исключается положительная обратная связь, приводящая к быстрому понижению температуры в ареале проема.

Нетривиальный вариант организации защиты имеет свою цену. Стремление к работе на предельном режиме с пониженными скоростями струи не только увеличивает габаритные размеры оборудования, но и требует использования вентиляторов большой производительности и низкого напора. Это обстоятельство детально рассматривалось в работе [17], один из выводов которой звучал так: «...в ряде случаев речь может идти о разработке специальных вентиляторов с низконапорными и относительно высокорасходными характеристиками...».

Таким образом, самоорганизация встречных струй в любом своем проявлении формирует интенсивное рассеяние собственного потока импульса (а также теплоты и вещества). В одних задачах такое рассеяние носит конструктивный характер, в других рассеяние оказывает существенно негативное влияние. Преодоление негативных последствий как тривиальными, так и нетривиальными способами имеет свою цену или в энергетических затратах, или в увеличении габаритных размеров оборудования и строительных конструкций.

## **Заключение**

1. В явлениях самоорганизации гидродинамических систем просматривается пространственно-временная структура с воздействиями последующих движений на предшествующие. За информационным аспектом этой структуры стоят общие законы гидродинамики. При этом система не испытывает жесткого принуждения к той или иной форме упорядочения. Сложный нелинейный характер систем допускает возникновение масштабных динамических новообразований под воздействием слабых информационных посылов.
2. В зависимости от характера технической задачи самоорганизация может оказаться как позитивным (конструктивным) фактором, так и негативным. В последнем случае не следует пытаться задавить явление — его нужно или использовать, или обойти каким-либо способом.

## Литература

1. Марр Ю. Н. Еще раз о феномене радиального колеса типа Ц14-46 // Инженерные системы — АВОК Северо-Запад. № 1. 2020. С. 6–12.
2. Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994. — 236 с.
3. Roshko A. On the wake and drag of bluff bodies. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 22, № 2, 124–132 (1955), (имеется перевод на русский).
4. Швегжда С. А., Марр Ю. Н., Жюгжда И. И., Жукаускас А. А. Нестационарность течения около цилиндра, поперечно обтекаемого потоком воздуха // Труды АН Литовской ССР, серия Б, т. 6 (103) (1977). — С. 73–78.
5. Марр Ю. Н., Швегжда С. А. Особенности движения жидкости вблизи поверхности поперечно обтекаемого цилиндра // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа, № 4, 1989. — С. 65–71.
6. Bearman P.W. On vortex street wakes// *J. Fluid Mech.* (1967), vol. 28. Part 4. pp. 625–641.
7. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука. — 1982. — 472 с.
8. Голубев В. В. Труды по теории машущего крыла. Библиотека русской науки. Труды по аэродинамике. Государственное издательство технико-теоретической литературы. М. — Л. 1957. — 972 с.
9. Денщикова В. А., Кондратьев В. Н., Ромашов А. Н. О взаимодействии двух встречных струй // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. № 6. 1978. С. 165–167.
10. Бурцев И. С., Денисихина Д. М. Расчетное исследование течений, формирующихся при истечении воздуха из прямоугольных отверстий, перекрытых аркой // Сб. «Материалы Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». Москва. 2005.
11. Баландина Л. Я., Бурцев С. И., Денисихина Д. М., Мальгин Ю. В., Терехова С. А. Эффективное распределение воздуха с помощью «генератора комфорта» // Инженерные системы — АВОК Северо-Запад. 2007. № 4 (31). С. 68–71.
12. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Денисихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. — СПб: АВОК Северо-Запад. 2013. — 192 с.
13. Марр Ю. Н. Автоколебания встречных струй в проеме, защищенном двусторонней боковой завесой // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад. № 3. 2012.
14. Марр Ю. Н. Воздушно-тепловые завесы. Расчет и проектирование завес для защиты проемов промышленных и общественных зданий. — СПб.: АО «НПО «Тепломаш», 2017. — 160 с.
15. Белоцерковский С. М., Гиневский А. С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. М.: Физматгиз, 1995. — 368 с.
16. Алексеенко С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. М.: Институт компьютерных исследований. 2005. — 504 с.
17. Булыгин В. Г., Марр Ю. Н. Анализ сетевых характеристик при организации защиты проемов завесами // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад. № 4. 2015. С. 24–32.

