

## К ВОПРОСУ О «РЕЛАМИНИРИЗАЦИИ»

Целью публикации является выявление особенностей улавливания в инерционно-вакуумном золоуловителе. Инерционно-вакуумный золоуловитель (ИВЗ) — это золоулавливающий аппарат инерционного типа, имеющий степень очистки газов свыше 95 %. Актуальность статьи подтверждается государственной программой развития энергетики, заинтересованной в модернизации золоулавливающих аппаратов в связи с понижением ПДК золы, выбрасываемой электростанциями в воздух. К задачам, рассматриваемым в статье, относится описание процесса реламиниризации, представление его возникновения, расчет соответствующих значений для подтверждения его присутствия при процессе золоулавливания в ИВЗ. Результатами исследования являются расчеты, которые сопровождаются выводами.

**Ключевые слова:** процесс реламиниризации, золоулавливание, режим течения, инерционно-вакуумный золоуловитель, запыленный поток, инновация.

*Данные исследования проводятся в рамках НИР ОмГТУ №18052В.*

Известно [1–6], что реламиниризация (явление обратного перехода турбулентного течения в ламинарное) связана с особыми характеристиками течения газа, при которых резко падала интенсивность теплообмена. Причем это наблюдалось при сверхзвуковых режимах течения, где числа Рейнольдса  $Re$  значительно превышали границу существования турбулентных течений. На сегодняшний день это явление слабо изучено, но некоторое обоснование было представлено в [5].

Снижение интенсивности процесса теплообмена в устройствах в данной работе не рассматривается. Но само явление дало толчок изучению течения запыленного потока в новых золоуловителях, где реламиниризация позволяет значительно снизить или даже убрать поперечные пульсации потока, а значит, и золowych частиц в пограничном слое. Это позволило бы сконструировать такое устройство золоулавливания (рис. 1), где с большой вероятностью основная масса частиц (95 % и более) не уносилась бы в уходящий газовый поток.

Исходя из рис. 1, инерционно-вакуумный золоуловитель содержит вертикально расположенный двухступенчатый корпус 1, нижняя ступень которого представляет собой золоприемную камеру (ЗПК) 6, а верхняя — предназначена для золоотделения и выполнена в виде двух соосно расположенных цилиндрических обечайек 2, 3. Из них внутренняя обечайка 2 служит каналом 4 (входной патрубком) подвода очищаемых дымовых газов, а кольцевое пространство между двумя обечайками — каналом 5 отвода очищенных дымовых газов. Золоотделитель содержит также поворотную камеру (ПК) 8 в нижней части золоотделяющей ступени, сообщающую выход из канала 4 в канал 5 (выходной патрубок). ПК 8 выполнена с кольцами 12 на крестовине 13, над которым по оси корпуса 1 установлен

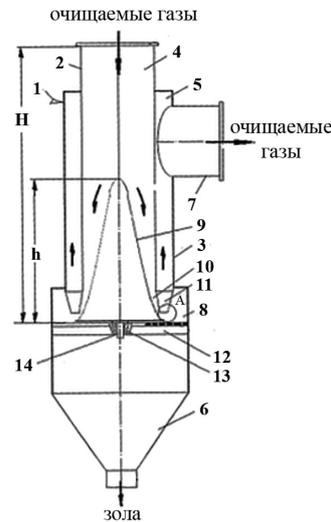
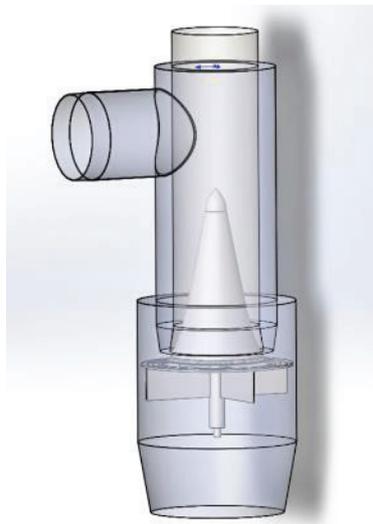
конусообразный обтекатель 9. Боковая поверхность последнего совместно с нижней частью внутренней обечайки 2 образует конфузорное выходное сопло 10 канала 4. Входной участок 11 кольцевого канала 5 выполнен диффузорным. Высота  $h$  обтекателя 9 составляет 0,5...0,8 высоты  $H$  внутренней обечайки 2, а угол  $\alpha$  сужения конфузорного сопла 10 равен углу повышения степени эффективности  $\beta$  расширения диффузорного участка 11 канала 5 отвода очищенных газов и составляет  $\alpha=\beta=(15...20)^\circ$ . Обеспечивается улучшение аэродинамики движения потока очищаемых дымовых газов в золоотделяющей части ступенчатого корпуса золоотделителя за счет повышения степени эффективности золоулавливания до 99,7 %.

В [6] показано, что переход турбулентного пограничного слоя в ламинарный экспериментально наблюдается в сильно конфузорных течениях жидкости и газа при отрицательных градиентах течения и при относительно небольшой шероховатости стенки.

В [5] подчеркивается, что переход возможен при ускорениях потока, что наблюдается в конфузорных каналах и при отрицательном градиенте давления.

Все перечисленные условия осуществления перехода из турбулентного потока в ламинарный на небольших участках течения имеют место быть в проточной части инерционно-вакуумного золоуловителя [7]. При этом возникает вопрос: при каких характеристиках течения и геометрии проточной части золоуловителя можно осуществить этот переход?

На поставленный вопрос можно ответить, руководствуясь рекомендациями [5]. Но использовать понятия толщины пограничного слоя  $\delta$  не представляется возможным по определению. Так как



**Рис. 1. Инерционно-вакуумный золоуловитель:**  
 1 — двухступенчатый корпус, 2, 3 — цилиндрические обечайки,  
 4 — входной патрубок, 5 — канал для очищенных дымовых газов,  
 6 — золоприемная камера (ЗПК), 7 — выходной патрубок,  
 8 — поворотная камера (ПК), 9 — обтекатель,  
 10 — конфузурное выходное сопло,  
 11 — входной диффузорный участок, 12 — кольцо,  
 13 — удерживающая кольца крестовина, 14 — ось

толщина пограничного слоя определяется там, где скорость невозмущенного потока составляет 99 % от скорости вдали от пограничного слоя. Теоретически же толщина пограничного слоя равна бесконечности. Поэтому рекомендации предлагают воспользоваться понятиями: толщина вытеснения  $\delta_1$  и толщина потери импульса  $\delta_2$ .

Толщина вытеснения определяется как:

$$\delta_1 = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u\rho}{u_{\infty}\rho_{\infty}}\right) dy.$$

Толщина потери импульса:

$$\delta_2 = \int_0^{\infty} \frac{u\rho}{u_{\infty}\rho_{\infty}} \left(1 - \frac{u}{u_{\infty}}\right) dy.$$

Здесь индекс  $\infty$  обозначает бесконечность, а  $u$  и  $\rho$  соответственно скорость и плотность газового потока.

По полученным данным из расчетного эксперимента [8] имеем: скорость на выходе из сопла  $u = 67$  м/с, кинематическая вязкость газов  $\nu = 26,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, тогда на отрезке обтекателя в 2 м перед выходом получаем число Рейнольдса  $Re_x$ , равное  $5,11 \cdot 10^6$ , что говорит о развитом турбулентном течении. Проанализируем условия возникновения реламинизации. По экспериментальным данным [2, 3] утверждается, что начальное значение числа  $Re_{\delta_2}$ , полученного по толщине потери импульса, составляло от 500 до 2000, что определяло резкий обратный переход в ламинарный режим с полным исчезновением турбулентности. При этом комплекс  $(\nu/u_{\infty}^2) \cdot (du_{\infty}/dx)$  достигает значения:  $(3 \div 4) \cdot 10^{-6}$ .

Расчет для  $Re_{\delta_2 \text{ крит}}$  показывает

$$Re_{\delta_2 \text{ крит}} = \frac{u \cdot \delta_2}{\nu} = \frac{67 \cdot 5,87 \cdot 10^{-4}}{26,2 \cdot 10^{-6}} = 1501,$$

что говорит о соблюдении вышеназванного условия при этом:

$$\begin{aligned} \delta_2 &= 0,664 \cdot \sqrt{\nu x / u_{\infty}} = \\ &= 0,664 \cdot \sqrt{26,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2}{67}} = 5,87 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Осталось убедиться, что и комплекс  $(\nu/u_{\infty}^2) \cdot (du_{\infty}/dx)$  в данной работе также соответствует условиям перехода турбулентного течения в ламинарное.

Для этого определимся с участком, на котором явление реламинизации позволит наиболее эффективно устранить турбулентные пульсации. Безусловно, этот участок прилегает к выходному сечению для газового потока и отстоит на небольшое расстояние от него. Рассмотрим участки конфузора с длиной 5–15 см. Расчеты показывают, что для данных участков от 5 см до 15 см с шагом 0,025 комплекс изменяется в соответствии с табл. 1.

Таким образом, полученные результаты расчета, при анализе которых можно сказать, что длина участка перед выходом из сопла лежит в пределах 8–10 см.

К сожалению, этих данных недостаточно для того, чтобы рассчитать геометрические характеристики всего аппарата в целом, т.к. на процесс течения оказывают влияние многочисленные параметры течения и конфигурация проточной части золоуловителя, которые нельзя получить на основе представленных анализов. Данные расчеты лишь показывают, что процесс реламинизации присутствует и это дает уверенность, что аппарат будет работать более эффективно в условиях отсутствия турбулентных пульсаций.

Поэтому необходимо проводить численные экспериментальные исследования для учета всех особенностей течения газового потока с золовыми частицами.

Сам принцип улавливания, задуманный в инерционно-вакуумном золоуловителе, представляет большой интерес. Сложность же данной разработки состоит в том, что над подобными новыми

Таблица изменения комплекса в зависимости от протяженности участка

Длина участка	0,05	0,06	0,075	0,08	0,1	0,12	0,125	0,15
Значение комплекса $10^{-6}$	6,3	5,25	4,2	3,94	3,15	2,625	2,52	2,1

конструкциями надо работать в три этапа. Первый этап — моделирование установок с расчетом движения потока в них на программном оснащении. Второй этап — проверка полученных эмпирических данных в натурном эксперименте. Третий этап — корректировка конструкции с учетом всех факторов проведенного эксперимента и возвращение к первому этапу, на котором вновь будет проводиться верификация. Поэтому проведенный выше анализ позволяет с большой уверенностью утверждать о высокой эффективности аппарата.

В случае ИВЗ ранее уже был проведен натурный эксперимент, на нем получена большая эффективность улавливания частиц. Сажу аппарат улавливал и вовсе с эффективностью в 100 %. С золой же дело обстоит иначе. Существует ряд факторов теоретически возможных, например, таких как разряжение в поворотной камере, бункере, область подсосывания под крупную частицу мелких частиц; но подтвердятся ли они все в натурном эксперименте, остается под вопросом.

Конструктивные решения, которые были использованы при исследовании инновационного золоуловителя, благоприятно сказались на установке без дополнительного технического оснащения (максимальная эффективность которой была порядка 99 %). Лучший вклад в эффективность аппарата внес обтекатель, который увеличил ее на 80 %. Остальные 11 % были достигнуты с учетом поворотной камеры и модернизации обтекателя.

Без поворотной камеры принцип аппарата заключался в достижении потока скоростей порядка 60 м/с, частицы золы в потоке летели с запаздыванием, и тем не менее скорость их была высока. Они либо летели и ударялись о кольца, за счет чего теряли набранную ими кинетическую энергию, либо летели в сторону стенки бункера, где ударялись (чаще это мелкие, более летучие частицы) и опадали в бункер. Естественно, из-за последнего происходил большой абразивный износ поверхности. При наличии поворотной камеры принцип изменился. В пограничном слое скорости потока равны 0 м/с. Из-за плавного подсоса износа в поворотной камере нет, в них происходит потеря кинетической энергии, как видно из ряда экспериментальных изображений, и они оседают в бункер.

Высота обтекателя — также является немаловажным фактором эффективности улавливания установки. От нее зависит, сумеет ли поток за отведенное ему время набрать скорость, благодаря которой будет производиться качественное улавливание или нет. Высота входного патрубка влияет на эффективность таким же образом, как и высота обтекателя.

Кольца вносят свой особенный вклад в улавливание зольных частиц. Разделяя собой плоскость между ходом газов и бункером с уловленными частицами. Их присутствие дает подстраховку на тему того, что если не будет эффекта в улавливании за счет подсоса, то частицы все равно будут лететь

вниз и ударяться о кольца. Теоретически они все же выступают разделом для создания снизу разреженной зоны.

Отклонения в работу вносят: осесимметричность [9]; наличие троса, на котором держится обтекатель [10]. Зависимость влияния осесимметричности на влияние степени улавливания неоднозначна, нет стабильного улучшения показателей или ухудшения по мере увеличения сдвига. Любое изменение сечения на выходе из входной трубы приводит к тому, что распределение скоростей по ходу потока становится по обе стороны обтекаемого с кольцами неодинаковым. В связи с необходимостью отслеживания динамики движения дисперсного потока было принято решение исследовать различные конструкции золоулавливающей установки методом проведения численного эксперимента, на основании которых произвести выбор установки с лучшей эффективностью.

#### Библиографический список

1. Лазарев Л. Я. Исследование и расчет сверхзвуковых соплых решеток турбин: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1964. 153 с.
2. Moretti P. M., Kays W. M. Heat Transfer to a turbulent boundary layer with varying free stream velocity and varying surface temperature an experimental study // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1965. Vol. 8, Pt. 9. P. 1187–1202.
3. Schraub F. A., Reynolds W. C., Schraub F. A. [et al.]. The structure of turbulent boundary layers // Journal of Fluid Mechanics. 1967. Vol. 30, Issue 4. P. 741–773.
4. Марков Н. М. Теория и расчет лопаточного аппарата осевых турбомашин. Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1966. 240 с.
5. Кэйс В. М. Конвективный тепло- и массообмен / пер. с англ. И. Н. Дулькина. М.: Энергия, 1972. 448 с.
6. Юренев В. Н., Лебедев П. Д. Теплотехнический справочник. В 2 т. М.: Энергия, 1976. Т. 2. 896 с.
7. Пат. 175570 Российская Федерация, МПК В 10 D 45/06. Инерционно-вакуумный золоотделитель для очистки дымовых газов / Белоглазов В. П., Белоглазова Л. В., Градобоев В. Н. № 2017100591; заявл. 12.01.17; опубл. 11.12.17, Бюл. № 35.
8. Белоглазов В. П., Белоглазова Л. В. Влияние входной скорости в инерционно-вакуумном золоуловителе на степень улавливания золы экибастузского угля // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 183–185.
9. Белоглазов В. П., Белоглазова Л. В., Чавриков И. Е., Роцин Н. Н. Влияние осесимметричности «сомбреро» на степень эффективности улавливания инерционно-вакуумного золоуловителя // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 230–232.
10. Белоглазов В. П., Белоглазова Л. В. Влияние высоты расщепителя на эффективность улавливания золы экибастузского угля в инерционно-вакуумном золоуловителе // Надежность и безопасность энергетики. 2016. № 1 (32). С. 46–49.

**БЕЛОГЛАЗОВ Владимир Петрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры

«Энергетика» Нижневартковского государственного университета; доцент кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 8887-0523,

AuthorID (РИНЦ): 776613

Адрес для переписки: vrbn@mail.ru

**МОСТОВЕНКО Любовь Владимировна**, аспирантка, ассистент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ.

SPIN-код: 6690-6134

AuthorID (РИНЦ): 828260

ORCID: 0000-0003-0675-0622

AuthorID (SCOPUS): 57193122905

ResearcherID: M-9932-2015

Адрес для переписки: teploblv@mail.ru

#### Для цитирования

Белоглазов В. П., Мостовенко Л. В. К вопросу о «реламиниризации» // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 64–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-64-67.

Статья поступила в редакцию 09.06.2018 г.

© В. П. Белоглазов, Л. В. Мостовенко

УДК 656.259.12:004.85:004.896

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-67-72

**Д. В. БОРИСЕНКО  
И. В. ПРИСУХИНА  
С. А. ЛУНЁВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## МАШИННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ

Электрическая рельсовая цепь широко применяется на железнодорожном транспорте в качестве датчика информации о положении подвижных единиц и исправности пути. Повышение эффективности систем мониторинга рельсовых цепей требует решения задачи автоматического анализа информации об их состоянии. В этой статье под такой задачей мы понимаем автоматическую классификацию режима работы электрической рельсовой цепи. Для решения задачи мы разработали алгоритм машинной классификации на основе логистической регрессии. В статье представлены основные этапы разработки алгоритма, выполнено их теоретическое обоснование, продемонстрирована работа алгоритма на синтезированных данных.

**Ключевые слова:** железнодорожная автоматика, электрическая рельсовая цепь, машинное обучение, классификация, логистическая регрессия.

**Введение.** На железных дорогах Российской Федерации электрическая рельсовая цепь является основным источником информации о положении подвижных единиц. Ее можно рассматривать как самостоятельную электротехническую систему. Различают три режима работы данной электротехнической системы: нормальный, шунтовой и контрольный [1].

С развитием систем диагностики и мониторинга на железнодорожном транспорте растет объем собираемой и накапливаемой электротехнической информации, в том числе и получаемой от рельсовых цепей. Закономерно возникает задача автоматической обработки этой информации. Решение данной задачи является одним из приоритетных направлений в рамках проекта «Цифровая железная дорога» [2, 3]. Таким образом, актуальность разработки алгоритмов автоматической классификации режима работы электрических рельсовых цепей не вызывает сомнений.

Очевидно, что на современном этапе задача такого рода должна решаться методами машинного обучения. В настоящее время накоплен большой опыт успешного решения подобных задач в различных областях [4–8]. Базовым и наиболее простым методом, позволяющим решить задачу машинной классификации, на наш взгляд, является логистическая регрессия [4].

**Данные для обучения.** Логистическая регрессия относится к семейству алгоритмов машинного обучения с учителем.

Для построения классификатора на основе логистической регрессии требуются данные о параметрах электрических сигналов при работе рельсовой цепи в различных режимах — обучающая и тестовая выборки, содержащие идентификаторы режимов.

Обучающая и тестовая выборки могут быть синтезированы на основе математической модели электрической рельсовой цепи. Теория электрических