



## Установка физического моделирования ветровой нагрузки на крановые конструкции

© Л.А. Сладкова, В.В. Крылов, Ф.А. Кузнецов

*Российский университет транспорта, г. Москва, Россия*

**Резюме:** Цель – воспроизведение нормативного ветрового потока (ламинарный, турбулентный, пульсационный режимы) для изучения воздействия на крановые конструкции, позволяющее получить значения нагруженности элементов крана, максимально приближенные к реальным условиям. При создании установки, относящейся к области экспериментальной аэродинамики, был принят «принцип имитации основных факторов, определяемых условиями эксплуатации объекта исследования», для обеспечения воспроизводимости результатов испытаний в максимальной степени. Для подтверждения работоспособности предлагаемого устройства установки, была разработана ее компьютерная модель с использованием программного продукта системы автоматизированного проектирования SolidWorks. Параметры компьютерной модели находятся в полном геометрическом соответствии с размерами разработанной реальной установки. Использование установки позволяет исследовать динамическое воздействие ветра на устойчивость крановых конструкций в различных режимах эксплуатации (изменение скорости ветра, в режиме работы с грузом, в условиях работы у пристенка и т.д.). Предложенная установка позволяет моделировать нагрузки на крановое оборудование с возможностью расширения характеристик, например, его грузоподъемности. Сформированная компьютерная модель установки позволяет выявить физическую картину распределения ветрового потока на выходе из установки. Результаты моделирования ветрового потока на предлагаемой установке подтверждены на компьютерной модели с высокой степенью сходимости результатов при скоростях ветра от 2,5 м/с и ниже. Предлагаемая авторами установка позволит моделировать величину реальной среднестатистической ветровой нагрузки различной интенсивности, пульсационную составляющую ветровой нагрузки, вихревое возбуждение, повышение доступной возможности аэродинамических исследований для реальной крановой конструкции. Разработанная установка представляет собой устройство для тарировки внешних воздействий от силы ветра на конструкцию крана.

**Ключевые слова:** установка, физическое моделирование, ветровая нагрузка, крановые конструкции

**Для цитирования:** Сладкова Л.А., Крылов В.В., Кузнецов Ф.А. Установка физического моделирования ветровой нагрузки на крановые конструкции. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1199–1208. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1199-1208>

## Installation of physical simulation of wind load on crane structures

Lyubov A. Sladkova, Vadim V. Krylov, Filipp A. Kuznetsov

*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

**Abstract:** The purpose of the paper is to reproduce a standard wind flow (laminar, turbulent, pulsating modes) to study the impact on crane structures, with the aim to obtain the load values of crane elements most closely approximate to real conditions. When creating an installation, which is related to the field of experimental aerodynamics, the "principle of simulating the main factors determined by the operating conditions of the research object" is adopted to ensure the reproducibility of test results to the maximum extent. To confirm the performance efficiency of the proposed installation device, its computer model is developed using the CAD software SolidWorks. The computer model parameters are in full geometric agreement with the dimensions of the developed real installation. The use of the installation makes it possible to study the dynamic effect of the wind on the stability of crane structures in various operation modes (change in wind speed, in the mode of load operation, in operation conditions at the wall, etc.). The proposed installation allows to simulate the loads on crane equipment with the possibility of characteristics expanding, for example, its carrying capacity. The generated computer model of the installation makes it possible to reveal the physical picture of wind flow distribution at the installation outlet. The results of wind flow simulation on the proposed installation are confirmed on a computer model with a high degree of convergence of results at wind speeds of 2.5 m/s and lower. The installation proposed by the authors will allow to simulate: the value of the real average statistical wind load of various intensity; pulsating component of the wind load; vortex excitation; increase of the available aerodynamic research capability for a real crane structure. The

developed installation is a calibration device for external impacts of the wind force on the crane structure.

**Keywords:** installation, physical simulation, wind load, crane structures

**For citation:** Sladkova LA, Krylov VV, Kuznetsov FA. Installation of physical simulation of wind load on crane structures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1199–1208. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1199-1208>

## ВВЕДЕНИЕ

Действие ветровой нагрузки на крановые конструкции не теряет своей актуальности в силу многофакторности изменения самой ветровой нагрузки как любого природного явления. Нормативными документами (ГОСТ Р 56728-2015<sup>1</sup>, ГОСТ 1451-77<sup>2</sup>) предусмотрена методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции и сооружения. Однако практика их эксплуатации показывает, что, несмотря на учет этих нормативов, «кранопадение» от действия ветра в результате потери устойчивости имеет место быть во многих регионах России и мира (частное происшествие в Гомеле<sup>3</sup>). Следует отметить, что потеря устойчивости крановых конструкций происходит не только в результате действия ветра<sup>2,3</sup> [1–3], но и при работе на неустойчивых (слабонесущих) грунтах [4–7]. В трудах [1–3] авторы рассматривают действие ветровой нагрузки на груз самоходных строительных кранов (ССК) при скоростях ветра от 0 до 20 м/с, исходя из условий динамического равновесия, в различных условиях эксплуатации, хотя практика эксплуатации утверждает, что падение кранов может происходить даже в ненагруженном состоянии.

Назначение любой экспериментальной установки направлено на достоверное воспроизведение внешних факторов на испытываемое изделие и получение максимально точных измерений контролируемых парамет-

ров этого изделия. Создание экспериментальной установки, воспроизводящей реальную ветровую нагрузку, основано на формировании нормативного ветрового потока (ГОСТ Р 56728-2015<sup>1</sup>) в соответствующем уменьшенном линейном масштабе на изделие. Как правило, для этих целей используют аэродинамические трубы – устройства, предназначенные для моделирования воздействия среды на движущиеся в ней тела. Применение труб в аэродинамике базируется на принципе обратимости движений и теории подобия физических явлений<sup>4</sup> [8, 9]. Аэродинамические трубы (испытательные стенды<sup>5</sup>) [10, 11] предназначены для изучения аэродинамических воздействий на здания, сооружения и их элементы, весового эксперимента, диапазона возможных значений составляющих аэродинамической (силы и момента) и для изучений аэродинамических характеристик крыла летательного аппарата. Все установки отличаются громоздкостью и высокой стоимостью и необходимы для стационарных исследований конструкций и сооружений [12, 13] авиационной и ракетной отрасли исследований двигателей и аэродинамических характеристик летательных аппаратов (отчет Научно-исследовательского института механики<sup>6</sup>).

Сказанное позволило сформулировать цель исследований: создание экспериментальной установки для воспроизведения

<sup>1</sup>ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции. Введ. 01.05.2016. М.: Стандартинформ, 2019.

<sup>2</sup>ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и методы определения. Введ. 01.01.1978. М.: Изд-во стандартов, 2003.

<sup>3</sup>Фотофакт: на улице Интернациональной перевернулся автокран // Гомельская правда [Электронный ресурс]. URL: <https://gp.by/category/news/crime/news117576.html> (05.03.2020).

<sup>4</sup>Аэродинамическая труба // Большая советская энциклопедия: в 30 т. / гл. ред. А.М. Прохоров. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

<sup>5</sup>Испытательный стенд «Аэродинамическая труба». [Электронный ресурс]. URL: [http://mgsu.ru/customer/Подразdeleniya/Aerodinamika\\_i\\_aeroakustika/Oborudovaniye](http://mgsu.ru/customer/Подразdeleniya/Aerodinamika_i_aeroakustika/Oborudovaniye) (05.03.2020).

<sup>6</sup>Отчет о научно-исследовательской работе (шифры темы по плану НИР института: 5.3; 01201152147). К определению ветровых нагрузок на пролетную конструкцию вантового моста / В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, Науч.-иссл. ин-т механики, 2015. 37 с.



нормативного ветрового потока изучения воздействия на крановые конструкции (ламинарный, турбулентный, пульсационный режимы). Решением этой задачи занимаются ученые и специалисты ведущих научных объединений России и зарубежья, используя для этих целей научно и экспериментально обоснованные руководства [14], в которых изложены принципы проектирования и расчета испытательных стендов ракетных двигателей и объектов ракетно-космической техники. Для создаваемой нами установки интересен «принцип имитации основных факторов, определяемых условиями эксплуатации объекта исследования», так как она относится к области экспериментальной аэродинамики и должна в максимальной степени обеспечивать воспроизводимость результатов испытаний.

Разработанные национальные стандарты Российской Федерации по методам аэродинамических испытаний направлены в большей степени на решение экологических задач в области аэродинамических характеристик объектов и сооружений. Например, ГОСТ Р 56077-2014<sup>7</sup> устанавливает требования к методам аэродинамических испытаний конструкций и оборудования противодымной защиты зданий.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Проанализированный статистический материал аварий на кранах позволяет сделать вывод о том, что существующие методы расчета крановых конструкций с учетом действия ветровой нагрузки являются расчетным инструментом, исходными данными для которых должны являться изменение силовых характеристик давления ветра различной интенсивности и характера.

Оценку влияния давления ветра на устойчивость кранов, работающих на открытом воздухе, в настоящее время проводят согласно ГОСТ 1451-77<sup>2</sup>.

Задача создания установки для моделирования потока ветра связана с его воздей-

ствием на крановые конструкции, как одного из основных факторов внешнего воздействия, учет которого определяет устойчивую работу крана. Совершенно очевиден факт падения кранов в результате действия ветровой нагрузки из-за отсутствия действительного распределения потока ветра на конструкцию при различных условиях его эксплуатации. Созданная установка позволит моделировать:

- величину реальной среднестатистической ветровой нагрузки различной интенсивности;
- пульсационную составляющую ветровой нагрузки;
- вихревое возбуждение;
- повышение доступной возможности аэродинамических исследований для реальной крановой конструкции.

Основной причиной является сложность прогнозировать ветер, вызванный определенными метеорологическими процессами: штормовые порывы и пульсацию.

Предлагаемая установка (рис. 1, 2) соответствует параметрам модели испытываемой конструкции стрелового крана в масштабе 1 к 20. Все линейные размеры были уменьшены на размер масштаба (в 20 раз), площади уменьшены в квадрат масштаба (в 400 раз).

Конструкция состоит из корпуса 1 (см. рис. 1), представляющего собой герметичный сплошностенчатый прямоугольный короб, выполненный из трехслойной шлифованной фанеры толщиной 4 мм (ГОСТ 3916.1-96<sup>8</sup>), на задней стенке которого размещены четыре параллельно соединенных вентилятора 5 (кулер Glacial Tech IceWind 14025). Короб для исключения действия на воздушный поток эффекта основания установлен на высоте 0,5 м на подставке 2. Передняя стенка короба снабжена регулируемыми по ширине зазора от 10 до 150 мм шторками 3, что позволяет (в соответствии с законами аэродинамики) регулировать величину давления пото-

<sup>7</sup>ГОСТ Р 56077-2014. Методы аэродинамических испытаний конструкций и оборудования противодымной защиты зданий. Введ. 01.03.2015. М.: Стандартинформ, 2019.

<sup>8</sup>ГОСТ 3916.1-96. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Введ. 01.01.1998. М.: Изд-во стандартов, 1999.

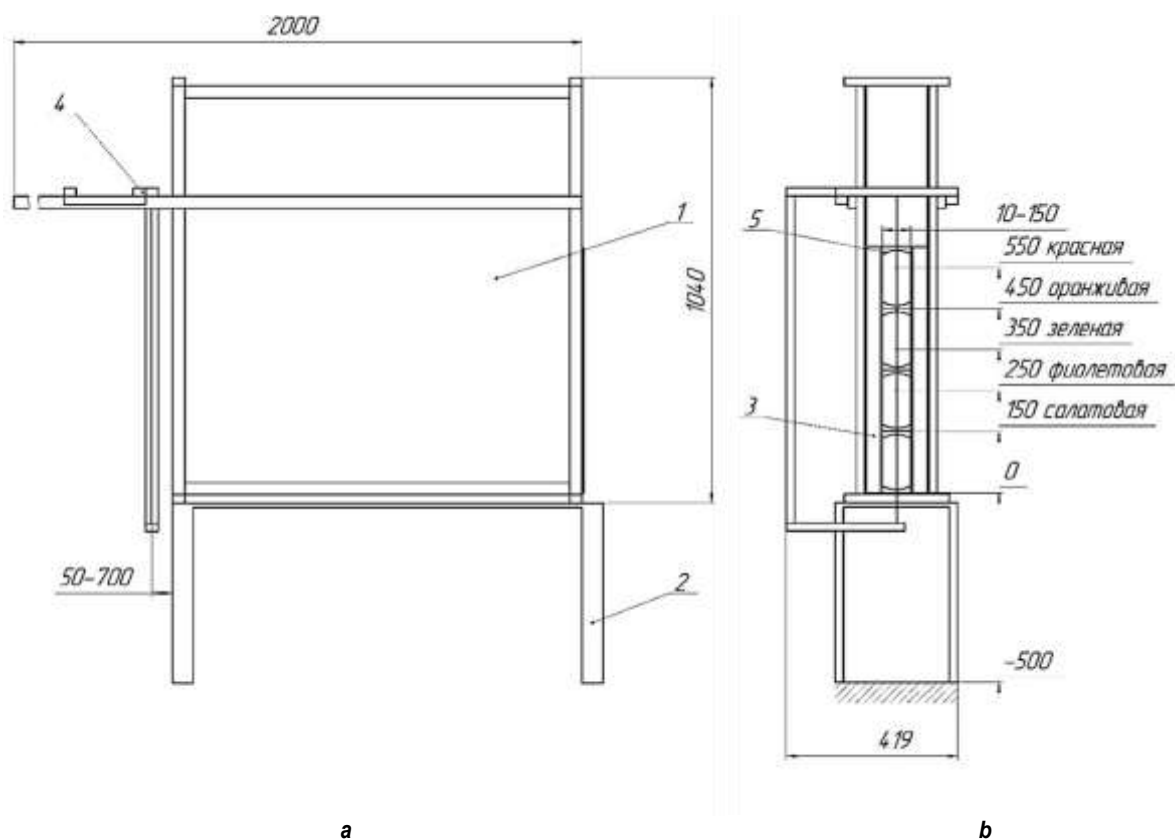


Рис. 1. Установка физического моделирования ветрового потока:

1 – корпус; 2 – подставка; 3 – регулируемые шторы;

4 – каретка с С-образной скобой для размещения «датчиков»; 5 – вентилятор

Fig. 1. Installation of wind flow physical simulation: 1 – body; 2 – support unit; 3 – adjustable curtains;

4 – carriage with a C-shaped bracket for "sensors" placing; 5 – fan

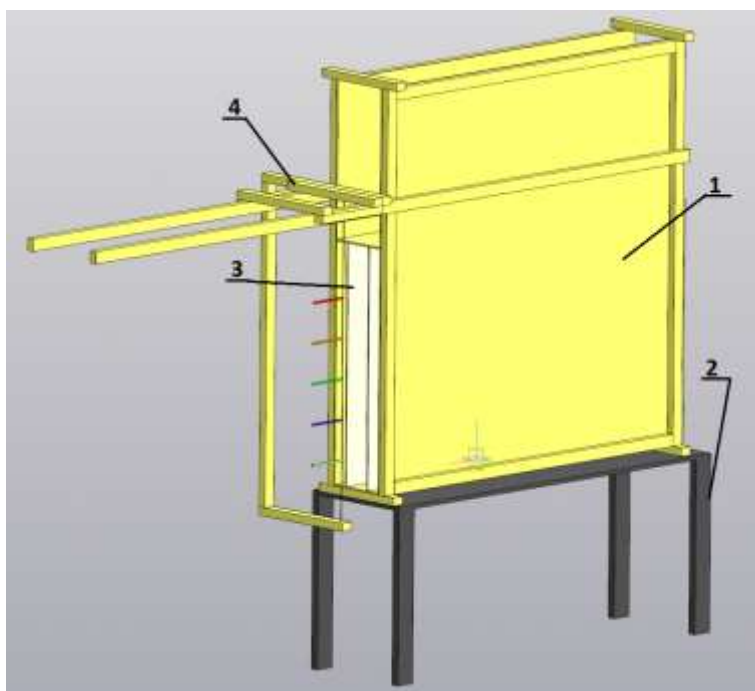


Рис. 2. Установка физического моделирования ветрового потока  
 (аксонометрическое изображение)

Fig. 2. Installation of wind flow physical simulation (an axonometric view)



ка ветра. К передней стенке корпуса крепится каретка 4 с С-образной скобой, на которой в вертикальной плоскости натянута леска диаметром 1 мм. На леске размещены «датчики», позволяющие фиксировать изменение потока ветра. Щель между шторками образует проход сложной формы (рис. 3), состоящий из двух частей. Первая часть – это сужение в виде конуса, у которого может изменяться угол между его осью и образующей конуса в интервале от 0 до  $42^\circ$ , при этом длина сужения меняется от 73 до 100 мм. Вторая часть представляет собой канал с прямолинейными направляющими (ограничение вертикально расположенными по вы-

соте короба плоскостями). Ширина канала может изменяться в зависимости от угла наклона образующей конусного сужения от 10 до 150 мм и при фиксированной длине равной 100 мм.

Такая форма прохода позволяет изучить давление ветра, дующего с переменной скоростью с учетом имитации ветровых нагрузок, максимально приближенным к условиям реальных испытаний, т.е. высоты конструкции.

Регулирование щели осуществляется вручную в зависимости от достижения желаемой скорости ветра, расчетные и экспериментальные величины которого приведены в таблице.

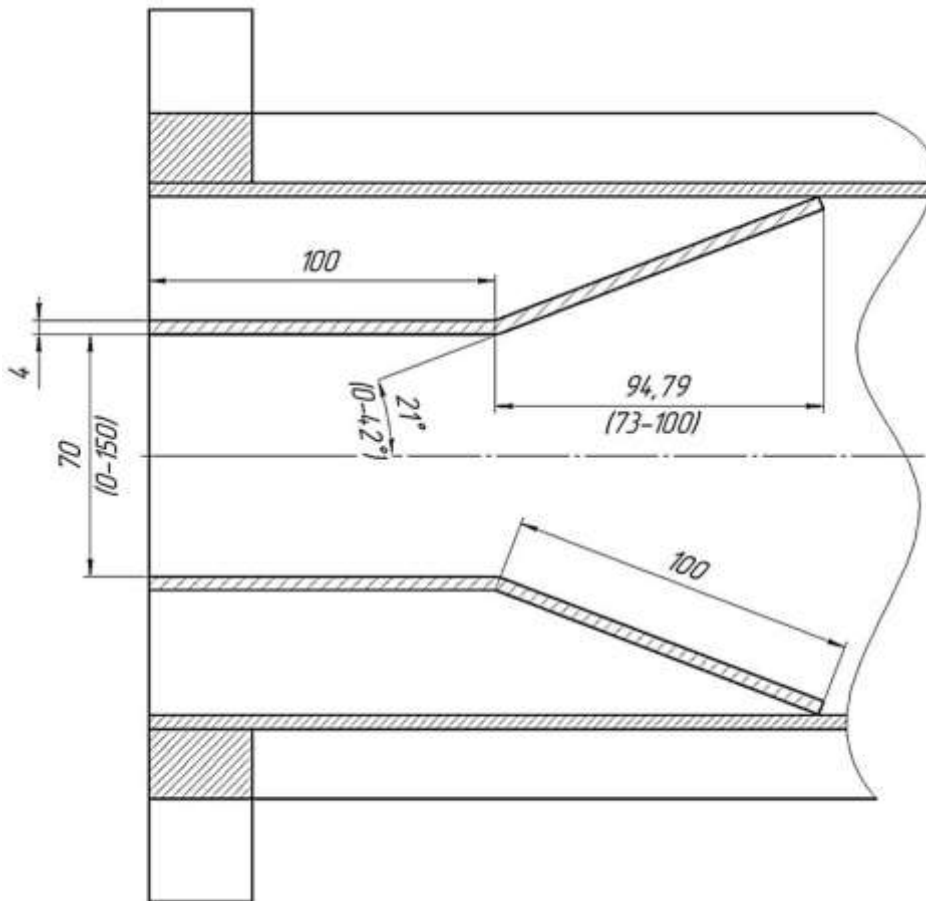


Рис. 3. Форма регулируемой щели  
Fig. 3. Shape of the adjustable slit

Изменение скорости ветра на выходе из щели установки  
Wind speed variation at the outlet from the installation slit

Скорость ветра, м/с \ Размер щели a, мм	10	30	50	70	90	110	130	150
Расчетная	16,12	5,37	3,22	2,30	1,79	1,47	1,24	1,07
Эксперимент	2,17	2,45	2,93	2,23	1,72	1,55	1,25	1,03



Расчетную величину скорости  $V$  (м/с) воздушного потока определим по зависимости (1)<sup>9</sup> [15]:

$$V = \frac{L}{3600F_{CT}}, \quad (1)$$

где  $L$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч;  $F_{CT}$  – площадь живого сечения щели, м<sup>2</sup>.

Расход воздуха  $L$  через установку от четырех кулеров равен 348,22 м<sup>3</sup>/ч.

Создание ветрового напора (скорость на выходе установки измерялась с помощью флюгера Вильда) в установке осуществляется четырьмя параллельно установленными вентиляторами<sup>10</sup> типа IceWind 14025, фирмы GlacialTech, мощностью 2,16 Вт (поменяв на вентиляторы с другим расходом воздуха, можно изменить скорость воздушного потока на выходе установки с требуемым диапазоном) и числом оборотов по паспортным данным производителя 1000 об/мин ± 250 об/мин. Реальные замеры тахометром показали, что число оборотов при вращении вентилятора составляет 1400 ± 40 об/мин. Параллельное соединение вентиляторов позволяет не только увеличить подачу воздуха, но и регулировать производительность в ветвях создаваемой системы.

Вентиляторы с диаметром лопастей 140 мм расположены на равном расстоянии (600 – 140·4)/3 = 13 мм друг от друга, что позволяет создавать равномерность потока воздуха, сформированного четырьмя вентиляторами. Длина короба 1000 мм выбиралась из условия формирования ламинарного потока перед испытываемым образцом.

Основанием для получения достоверных данных при использовании предлагаемой установки является математическое моделирование процессов, протекающих в установке. Моделирование нагрузок автокрана и возможность расширения его характеристик

грузоподъемности [16, 17], методика автоматизированного построения математической модели стрелового грузоподъемного крана [18] связаны в основном с обеспечением грузовой устойчивости кранов.

Аналогичная установка, выполненная в компьютерном варианте (рис. 4), была разработана с целью выявления характера формирования ветрового потока на выходе из установки. Модель компьютерной установки была создана в полном геометрическом соответствии с размерами разработанной установки, что с высокой степенью достоверности предполагает получение данных, которые составят основу проведения экспериментальных исследований. Моделирование потока осуществлялось в программном продукте SolidWorks<sup>11</sup> [19–21] с использованием критерия подобия – числом Рейнольдса  $Re$ .

Встроенные в компьютерной модели вентиляторы не являются идеальными, а моделируют создание воздушного потока в соответствии с исходными данными вентиляторов, выбранных для физической модели, показанной на рис. 1 и 2 (частота вращения, расход воздуха и т.д.). Тип потока через крыльчатку вращающегося вентилятора был выбран как ламинарный и турбулентный (интенсивность турбулентности 0,1%, масштаб турбулентности 0,00158 м).

Примерно через 2 с после начала формирования потока можно наблюдать по нижней шкале, что ламинарный режим начинается на расстоянии 200–300 мм, и на выходе из щели (10 мм) скорость достигает 0,888 м/с. Вентиляторы в этом варианте неидеальные встроенные (есть модель).

На рис. 4 видно, что по мере удаления от вентиляторов, завихрения воздуха сглаживаются, и линии тока потока воздуха выпрямляются, образуя ламинарный поток.

Полученные величины изменения скорости потока воздуха в зависимости от размера щели, полученные на компьютерной модели

<sup>9</sup>Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б., Байбаков О.В., Кирилловский Ю.Л. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.

<sup>10</sup>Параллельное соединение вентиляторов [Электронный ресурс]. URL: <https://engineerishka.ru/ventilyaciya/parallelnoe-soedinenie-ventilyatorov.html> (14.07.2020).

<sup>11</sup>Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. М.: Бинوم, 2004. 289 с.



установки, внесены в таблицу (см. строку «эксперимент»). Очевиден факт близкой корреляции полученных результатов, что свидетельствует о достоверности цифровых значений интенсивности ветрового потока, развиваемого разработанной установкой. Отличие эксперимента и расчета объясняется тем, что формула для расчета скорости «идеальная»: нет учета потерь на стенках (чем меньше щель, тем они более ощутимы).

Колебания воздушного потока (величину реальной среднестатистической ветровой нагрузки различной интенсивности, пульсационную составляющую ветровой нагрузки, вихревое возбуждение) на выходе из щели предлагается определять классическим методом<sup>12</sup> [22] путем размещения на вертикальной стойке С-образной скобы «датчиков» из шелковых нитей. Такой вид «датчиков» широко распространен при испытании самолетов при оценке обтекания профиля крыла набегающим потоком воздуха.

Для фиксации изменения потока воздуха по высоте профиля нити на стойке ско-

бы размещались на расстоянии 150 мм друг от друга и имели разный цвет (см. рис. 1). По их отклонениям можно судить об изменениях давления ветра на конструкцию, характере обтекания крана при любом его положении и любом размещении груза. Применение предлагаемых средств измерения и оценки величины и характера изменения силы ветра позволят контролировать процесс визуально.

Таким образом, разработанная установка представляет собой устройство для тарировки внешних воздействий от силы ветра на конструкцию крана. При проведении эксперимента можно будет получить наглядную картину распределения скорости воздушного потока, давления и возникающей аэродинамики (турбулентности) вблизи крановой конструкции, выявить причину потери устойчивости кранов от действия ветровой нагрузки и получить реальные расчетные зависимости, позволяющие рекомендовать проводить корректировку расчета кранов на ветровую нагрузку.

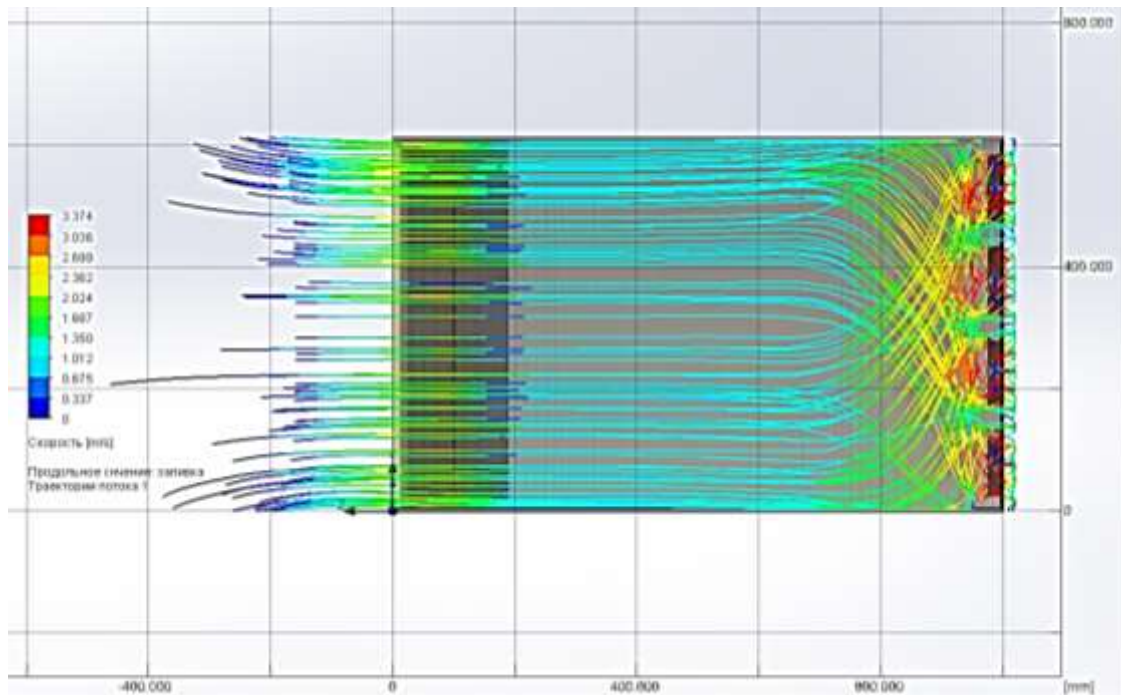


Рис. 4. Распределение потока воздуха в коробе  
Fig. 4. Air flow distribution in the duct

<sup>12</sup>Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика: учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1970. 423 с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая авторами установка позволит моделировать:

- величину реальной среднестатистической ветровой нагрузки различной интенсивности;
- пульсационную составляющую ветровой нагрузки;

- вихревое возбуждение;
- повышение доступной возможности аэродинамических исследований для реальной крановой конструкции.

Разработанная установка представляет собой устройство для тарировки внешних воздействий от силы ветра на конструкцию крана.

## Список литературы

1. Sekus D., Gnatowska R., Kwiatkoń P. Impact of wind on the movement of the load carried by rotary crane // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Issue 18. P. 21–22. <https://doi.org/10.3390/app9183842>
2. Синельщиков А.В., Джалмухамбетов А.И. Развитие методов расчета устойчивости башенных кранов // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2017. Т. 12. Вып. 12. С. 1342–1351. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.12.1342-1351>
3. Тарасова Т.В. Исследование устойчивости башенных кранов при воздействии ветровых нагрузок // *Современные научные исследования и инновации*. 2016. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/06/68604> (07.06.2020).
4. Jeng Shyr-Long, Yang Chia-Feng, Chieng Wei-Hua. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2010. Vol. 38. Issue 2. P. 145–170. <https://doi.org/10.1080/15397730903482702>
5. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Stability assessment as a criterion of stabilization of the movement trajectory of mobile crane working elements // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2018. Vol. 23. No. 1. P. 65–77. <https://doi.org/10.1515/ijame-2018-0004>
6. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. Crane stability assessment method in the operating cycle // *Transport Problems*. 2017. Vol. 12. Issue 4. P. 141–151. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.4.14>
7. Тюрин Ю.Н., Васильев Д.Е., Чугаев В.Д., Мяскин С.Л. Причины возникновения аварий при эксплуатации подъемных сооружений // *Химическая техника*. 2015. № 11. [Электронный ресурс]. URL: <https://chemtech.ru/prichiny-vozniknovenij-avarij-pri-jekspluatacii-podemnyh-sooruzhenij/> (15.06.2020).
8. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. 2-е изд. М.: Изд-во «ДМК Пресс», 2010. 464 с.
9. Жамалов Р.П., Королев Е.В., Котин А.И. Аэродинамические трубы как инструмент исследования. С. 54–62. // [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aerodinamicheskie-truby-kak-instrument-issledovaniya/viewer> (15.06.2020).
10. Хоробрых М.А., Фролов В.А. Проектирование экспериментальной установки для весового эксперимента в аэродинамической трубе // *Молодой ученый*. 2013. № 3. С. 116–122. [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/archive/50/6363/> (14.06.2020).
11. Бубенчиков А.А., Нифонтова Л.С., Чавриков И.Е. Установки для аэродинамического эксперимента // *Молодой ученый*. 2016. № 22. С. 11–14. [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/archive/126/35125/> (14.06.2020).
12. Clark R., Cox D., Curtiss Jr H.C., Edwards J.W., Hall K.C., Peters D.A, et al. A modern course in aeroelasticity // *Solid mechanics and its applications/ eds. E.H. Dowell*. 2005. Vol. 116. 781 p. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2106-2>
13. Волощенко О.В., Зосимов С.А., Николаев А.А., Острась В.Н., Серманов В.Н., Чевагин А.Ф. Аэродинамические экспериментальные стенды для испытаний ВРД // *Ученые записки Центрального аэрогидродинамического института*. 2012. Т. XLIII. No. 2. С. 43–54.
14. Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П., Родченко В.В. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. М.: Изд-во МАИ, 2014. 283 с.
15. Боровой В.Я., Бражко В.Н., Егоров И.В., Зайцев Е.Г., Скуратов А.С. Диагностика и численное моделирование течения в гиперзвуковых аэродинамических трубах импульсного действия // *Ученые записки Центрального аэрогидродинамического института*. 2013. Т. XLIV. No. 5. С. 28–38.
16. Мамаев К.М. Математическое моделирование нагрузок автокрана и возможность расширения его характеристик грузоподъемности // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2011. No. 23. Вып. 4. С. 76–80.
17. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V., Belyakov V.E. Study of the crawler crane stability affected by the length of compensating ropes and platform rotation angle in the mode of movement with payload // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1546. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012135>
18. Зырянова С.А. Методика автоматизированного построения математической модели стрелового грузоподъемного крана // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2014. Вып. 2. С. 77–81.
19. Жамалов Р.П., Королев Е.В., Котин А.И. Аэродинамические трубы как инструмент исследования // *Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института*. 2012. № 12. С. 54–62.
20. Прокопенко Е.А., Савищенко Н.П., Шевченко А.В., Поняев С.А., Твердохлебов К.В., Яшков С.А. Особен-





ности проведения экспериментальных исследований на сверхзвуковой атмосферно-вакуумной аэродинамической трубе // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12. Ч. 1. С. 31–36. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.005>

21. Cekus D., Gnatowska R., Kwiatoń P., Šofer M. Simulation research of a wind turbine using SolidWorks soft-

ware // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1398. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1398/1/012001>  
22. Острась В.Н., Пензин В.И. Экспериментальное исследование силы трения в канале при наличии псевдоскачка // Ученые записки Центрального аэрогидродинамического института. 1974. Т. V. № 2. С. 151–155.

## References

1. Cekus D, Gnatowska R, Kwiatoń P. Impact of wind on the movement of the load carried by rotary crane. *Applied Sciences*. 2019;9(18):21–22.

<https://doi.org/10.3390/app9183842>

2. Sinel'shchikov AV, Dzhal'mukhambetov AI. Development of methods for stability analysis of tower cranes. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta = Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2017;12(12):1342–1351. (In Russ.)

<https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.12.1342-1351>

3. Tarasova TV. Investigation of the stability of tower cranes under the influence of wind loads. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii = Modern scientific researches and innovations*. 2016;6. Available from: <http://web.snauka.ru/issues/2016/06/68604> [Accessed 7th June 2020]. (In Russ.)

4. Jeng Shyr-Long, Yang Chia-Feng, Chieng Wei-Hua. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2010;38(2):145–170. <https://doi.org/10.1080/15397730903482702>

5. Kacalak W, Budniak Z, Majewski M. Stability assessment as a criterion of stabilization of the movement trajectory of mobile crane working elements. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2018;23(1):65–77.

<https://doi.org/10.1515/ijame-2018-0004>

6. Kacalak W, Budniak Z, Majewski M. Crane stability assessment method in the operating cycle. *Transport Problems*. 2017;12(4):141–151. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.4.14>

7. Tyurin YuN, Vasil'ev DE, Chugaev VD, Masyakin SL. Causes of accidents when operating cranes. *Himicheskaya tekhnika*. 2015;11. Available from: <https://chemtech.ru/prichiny-vozniknovenij-avarij-pri-jekspluatcii-podemnyh-sooruzhenij/> [Accessed 15th June 2020]. (In Russ.)

8. Alyamovskij AA. *Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press; 2010, 464 p. (In Russ.)

9. Zhamalov RR, Korolev EV, Kotin AI. Windpipes – a research tool. P. 54–62. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/aerodinamicheskie-truby-kak-instrument-issledovaniya/viewer> [Accessed 15th June 2020]. (In Russ.)

10. Horobryh MA, Frolov VA. Designing of an experimental installation for a weight experiment in a wind tunnel. *Molodoj uchenyj = Young Scientist*. 2013;3:116–122. Available from: <https://moluch.ru/archive/50/6363/> [Accessed 14th June 2020]. (In Russ.)

11. Bubenchikov AA, Nifontova LS, Chavrikov IE. Instal-

lations for aerodynamic experiment. *Molodoj uchenyj = Young Scientist*. 2016;22:11–14. Available from: <https://moluch.ru/archive/126/35125/> [Accessed 14th June 2020]. (In Russ.)

12. Clark R, Cox D, Curtiss Jr HC, Edwards JW, Hall KC, Peters DA, et al. A modern course in aeroelasticity. In: Dowell EH (eds.). *Solid Mechanics and Its Applications*. 2005, vol. 116, 781 p.

<https://doi.org/10.1007/1-4020-2106-2>

13. Voloshchenko OV, Zosimov SA, Nikolaev AA, Ostras' VN, Sermanov VN, Chevagin AF. Aerodynamic experimental test benches for airbreathing jet engine tests. *Uchenye zapiski Central'nogo aerogidrodinamicheskogo instituta*. 2012;XLIII(2):43–54. (In Russ.)

14. Galeev AG, Zakharov YuV, Makarov VP, Rodchenko VV. *Designing test benches for experimental testing of objects of rocket and space facilities*. Moscow: Moscow Aviation Institute; 2014, 283 p. (In Russ.)

15. Borovoj VYa, Brazhko VN, Egorov IV, Zajcev EG, Skuratov AS. Diagnostics and numerical simulation of impulse action flow in hypersonic wind tunnels. *Uchenye zapiski Central'nogo aerogidrodinamicheskogo instituta*. 2013;XLIV(5):28–38. (In Russ.)

16. Mamaev KM. Mathematical modeling of the load of the crane and the possibility of extending his load characteristics. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2011;23(4):76–80. (In Russ.)

17. Korytov MS, Shcherbakov VS, Titenko VV, Belyakov VE. Study of the crawler crane stability affected by the length of compensating ropes and platform rotation angle in the mode of movement with payload. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1546. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012135>

18. Zyryanova SA. Methodology of the automated creation of mathematical model of the boom load-lifting crane. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2014;2:77–81. (In Russ.)

19. Zhamalov RR, Korolev EV, Kotin AI. Windpipes – a research tool. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-ekonomicheskogo instituta = Bulletin NGIEI*. 2012;12:54–62. (In Russ.)

20. Prokopenko EA, Savischenko NP, Shevchenko AV, Ponyaev SA, Tverdokhlebov KV, Yashkov SA. Features of experimental research on supersonic atmospheric vacuum driven tunnel. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*. 2018;12(1):31–36.

<https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.005>

21. Cekus D, Gnatowska R, Kwiaton P, Šofer M. Simulation research of a wind turbine using SolidWorks software. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1398. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1398/1/012001>

22. Ostras' VN, Penzun VI. Experimental study of friction force in a channel under pseudoshock. *Uchenye zapiski Central'nogo aerogidrodinamicheskogo instituta*. 1974;V(2):151–155. (In Russ.)

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Сладкова Любовь Александровна**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры наземных  
транспортно-технологических средств,  
Российский университет транспорта,  
127055, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия;  
✉ e-mail: rich.cat2012@yandex.ru

**Крылов Вадим Викторович**,  
заведующий лабораториями,  
кафедра наземных транспортно-технологических  
средств,  
Российский университет транспорта,  
127055, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия;  
e-mail: vadimkrylov96@yandex.ru

**Кузнецов Филипп Александрович**,  
аспирант,  
Российский университет транспорта,  
127055, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия;  
e-mail: odevmaltkun@gmail.com

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 19.09.20; одобрена после рецензирования 23.10.2020; принята к публикации 20.12.2020.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Lyubov A. Sladkova**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Ground Transportation  
and Technological Means,  
Russian University of Transport,  
9 bld 9, Obrazcova St., Moscow 127055, Russia;  
✉ e-mail: rich.cat2012@yandex.ru

**Vadim V. Krylov**,  
Head of the Laboratories,  
Department of Ground Transportation and Technological  
Means,  
Russian University of Transport,  
9 bld 9, Obrazcova St., Moscow 127055, Russia;  
e-mail: vadimkrylov96@yandex.ru

**Filipp A. Kuznetsov**,  
Postgraduate Student,  
Russian University of Transport,  
9 bld 9, Obrazcova St., Moscow 127055, Russia;  
e-mail: odevmaltkun@gmail.com

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Information about the article**

The article was submitted on 19.09.20; approved after reviewing on 23.10.2020; accepted for publication on 20.12.2020.