





Complex Use of the PIV Method. A Review

Vasileva, Irina Leonidovna^{1*} 

Nemova, Darya Viktorovna¹ 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
Correspondence:* email vasilievaa_irina@mail.ru; contact phone [+79095863919](tel:+79095863919)

Keywords:

Turbulent flows, eddy flows, tracer visualization, flow velocity, PIV method, heat engineering, wind energy, HVAC

Abstract:

Particle Image Velocimetry (PIV), the latest method of digital tracer visualization is used for a wide range of practical and fundamental problems in modeling non-stationary turbulent reacting flows. It is based on a high-precision optical measurement system for measuring instantaneous flow velocity fields in laboratory conditions. The method is an innovative; accordingly, it requires a comprehensive analysis to identify its advantages and disadvantages, as well as to find poorly studied areas for the purpose of their feature research. The paper presents many options for using the PIV method - in wind energy, in medicine, in aircraft and mechanical engineering, in heating and ventilation systems, even in the field of sports (swimming). Facade structures have not been studied with this method yet.

1 Introduction / Введение

Турбулентность принадлежит к числу физических явлений, весьма распространенных в природе и технике, но на практике она представляет собой очень сложный объект для исследования. Хаотичное движение частиц газа или жидкости, скорость которых мгновенно меняется по величине и по направлению, трудно поддается описанию и поэтому представляет большой интерес для науки.

Одним из способов изучения турбулентных течений на ряду с наблюдением, численным и теоретическим моделированием, является лабораторный эксперимент. Преимущества лабораторных экспериментов нельзя не до оценить: во-первых, это возможность многократного проведения необходимых действий, что дает больше статистических данных для расчетов; во-вторых, можно варьировать различные параметры, условия. Методы экспериментального исследования турбулентных течений не стоят на месте. Процесс визуализации потока прошел долгий путь от первых наблюдений его Людвигом Прандталем и Леонардо да Винчи в естественной водной среде до цифровой трассерной визуализации, появившейся сравнительно недавно. Революция в области техники и программного оборудования позволила получать не только качественные, но и количественные показатели. Совершенствование этих средств дало толчок для стремительного развития методов визуализации потоков и особенно PIV (Particle Image Velocimetry), пользующийся сейчас большой популярностью в научной сфере.

2 The principle of the PIV method / Принцип метода PIV

Для мгновенного изучения структуры течения и регистрации распределения скоростей используется метод цифровой трассерной визуализации PIV (Particle Image Velocimetry) [1–3]. Трассером в военной тематике называют специальный снаряд, который при выстреле подсвечивает траекторию своего движения. Аналогично в жидкость или газ добавляются специальные частицы – трассеры для описания течения и визуализации. Требования, предъявляемые к частицам:

1. Их плотность должна соответствовать плотности среды, в которую они добавляются

2. Коэффициент преломления трассеров должен отличаться от коэффициента преломления жидкости или среды, которую исследуют
3. Частицы обычно имеют диаметр порядка 10-100 микрометров
4. Концентрация частиц должна быть достаточной для визуализации, но в тоже время не перебивающая сам поток. На рис.1 приведены примеры разных концентраций трассеров: низкая (а), средняя (б), высокая (в).

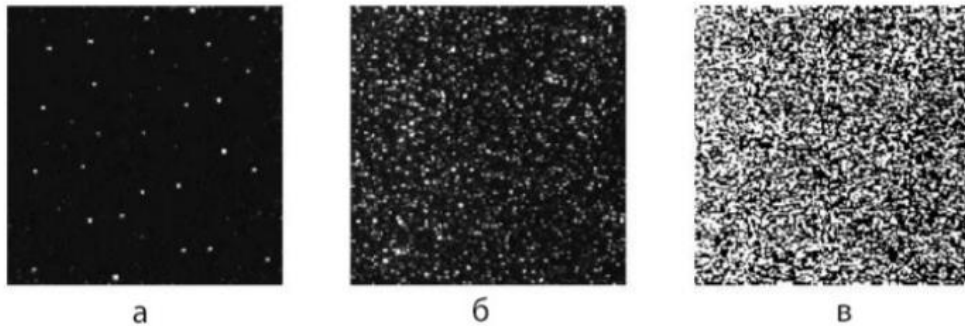


Рис. 1 – Концентрация трассеров
Fig. 1 - Tracer concentration

Для низкой плотности применяется метод PTV (particle tracking velocimetry), анализируя смещение отдельной частицы в области [4, 5]. Для высокой плотности применяется метод LSV (laser speckle velocimetry).

При использовании PIV при средней концентрации частицы в потоке подсвечиваются в выбранном сечении при помощи двойного лазера, формирующего два коротких импульса длительностью 6-10 нс. Этот процесс регистрируется оптической системой – высокоскоростной камерой (с матрицей CCD или CMOS) и передается на компьютер для дальнейшего кросс-корреляционного анализа. Обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц dS за время dt между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Таким образом, фактически регистрируется не скорость одной отдельно взятой визуализирующей частицы, а коллективная скорость движения ансамбля визуализирующих частиц, что обеспечивает малый уровень случайной погрешности. Принцип метода рассмотрен на рис 2.

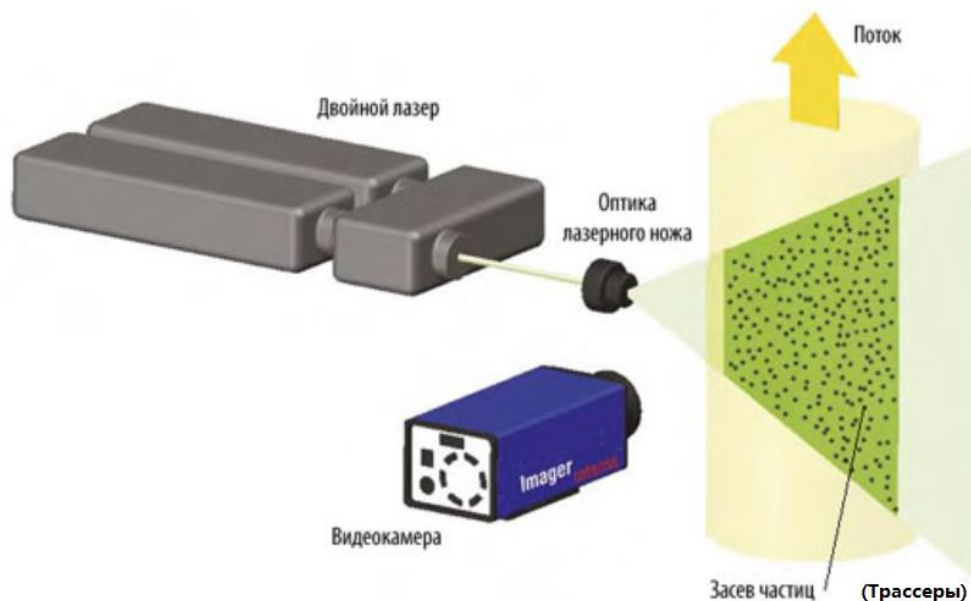


Рис. 2 – Принцип метода PIV
Fig. 2 - Principle of the PIV method

Цифровая обработка PIV-изображений включает в себя несколько этапов:

- 1) разделение каждой пары изображений на элементарные одинаковые расчетные области;
- 2) расчет кросскорреляционной функции для каждой области;
- 3) вычисление экстремума корреляционной функции;
- 4) попиксельное интерполирование максимума корреляционной функции [6].

Этот метод дает большое преимущество при изучении потоков, содержащих вихревые структуры, где мало эффективен одноточечный метод диагностики.

3 Applying the PIV method / Применение метода PIV

Технология PIV является очень востребованной при решении научных и практических задач. Рассмотрим некоторые из них.

В последнее время наблюдается интенсивный рост ветроэнергетики. На сегодняшний день она стала важной составляющей мирового энергетического потенциала, её вклад значителен. Эта тенденция повлекла за собой интерес к изучению научным сообществом различных аспектов, связанных с ветровыми потоками, их скоростью и интенсивностью [7].

В работе [8] описано использование данного инновационного метода для прогнозирования распределения ветровой энергии на местности для правильного расположения будущей ветроэлектростанции. Здесь наглядно представлены и сравниваются характеристики турбулентных течений воздушных потоков вокруг двумерных моделей холма с разными склонами. Эксперимент проводился в аэродинамической трубе. Подобные исследования проводились еще [9]–[11].

Такие частицы, как дождь, пыль и другой мусор, могут оказывать разрушительное структурное воздействие на ветряные турбины. Авторами [12] рассматривается турбулентный след от модели ветряной мельницы, подвергающейся турбулентному, однородному, изотропному, полидисперсному, многофазному потоку. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе при трех различных скоростях ветра несущего потока с равномерно диспергированными каплями воды при трех различных скоростях впрыскивания из распылительной сетки на входе в туннель. Применяя метод PIV, были проанализированы распределение энергии и частиц по размерам в турбулентном следе, беря во внимание предпочтительную концентрацию.

Развитый оптико-лазерный метод может быть успешно использован для диагностики обледенения на лопастях ветрогенератора. Кабардин И.К. в диссертации всесторонне исследует вихревой след на примере модели ротора ветрогенератора.

В последние десятилетия проблемы аэродинамики малоэтажных зданий привлекают широкое внимание и им посвящены научные исследования [13–16]. Малоэтажные здания обычно расположены в нижней части атмосферного пограничного слоя с большим градиентом скорости ветра и высокой интенсивностью турбулентности; кроме того, как правило, малоэтажные здания имеют тупой корпус, что приводит к очень сложным воздушным потокам вокруг них. Например, на кровлях образуются вихри - конические и отрывные. Ученые из Китая [17] проанализировали влияние различных форм кровель на характеристики обтекания здания с применением передовой технологии PIV и на распределении ветровой нагрузки в целом.

Ученые [18] исследовали модель кластера из 12 высотных зданий с использованием PIV на предмет генерируемых им тепловых потоков и их влиянием на окружающую среду (удаление загрязняющих веществ, взаимодействие с антропогенным теплом и т.д.). В подобном исследовании изучались аэродинамические характеристики двух высоких зданий [19].

При помощи современного PIV метода удалось качественно исследовалось пробковое (снарядное) течение, встречающееся при транспортировке нефти или газа в трубопроводах. Также оно имеет место в охладительных системах [20]. Под снарядным течением понимается двухфазное течение, при котором чередуются газ и жидкость.

При проектировании систем вентиляции и кондиционирования важной задачей стоит создание теплового комфорта в здании. В статье [21] рассматривается Аль-Тумама Стэдиум (Al Thumama Stadium). Исследователями были воспроизведены две модели секций стадиона – без зрителей и с 28-ю зрителями (рис.3). Было проведено сравнение прогнозируемой средней скорости воздуха, разница составила 27,2%.

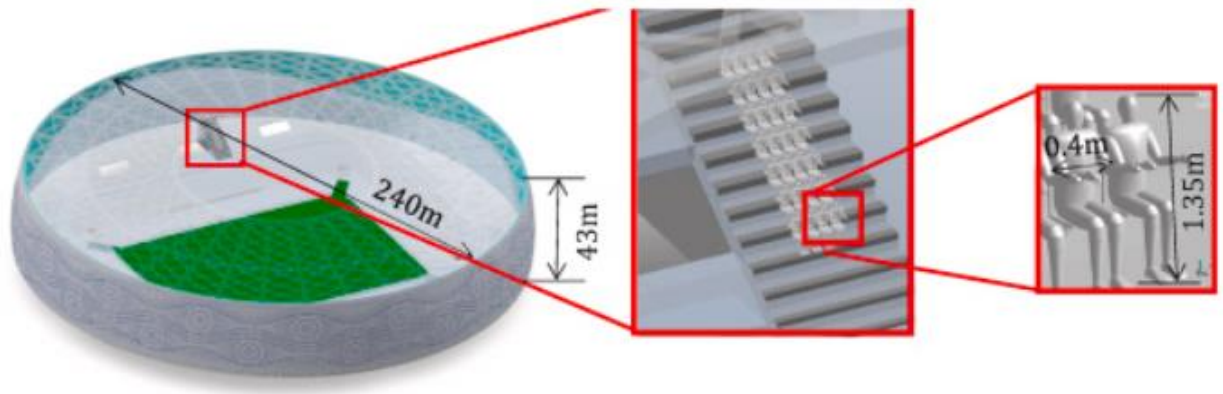


Рис. 3 – Модель секции стадиона со зрителями [21]
Fig. 3 - Model of the stadium section with spectators [21]

Эксперименты проводились в низкоскоростной аэродинамической трубе с замкнутым контуром на моделях с масштабом 1:10. Трассерные частицы были получены с использованием генератора тумана (Safex F2010). Применялся твердотельный Nd:YAG-лазер и камера FlowSense EO 4 M CCD от Dantec Dynamics с разрешением 2048x2048 пикселей. Для обработки полученных изображений и результатов использовалась программа DynamicStudio [22].

Подобные исследования проводились для изучения систем вентиляции в кабинах транспортных средств, включая кабины автомобилей, автобусов и коммерческие самолеты [22–27]. Были разработаны модели системы вытесняющей вентиляции (displacement ventilation, DV) [28] и индивидуальной вентиляции для кабин автомобилей [29–31]. В этих режимах учитывалась сложная структура потока воздуха, являющаяся результатом взаимодействия механического принудительного воздушного потока, подаваемого системой управления климатом (ECS), и естественной тепловой конвекции людей, находящихся в кабине. Экспериментальная схема представлена на рис.4.

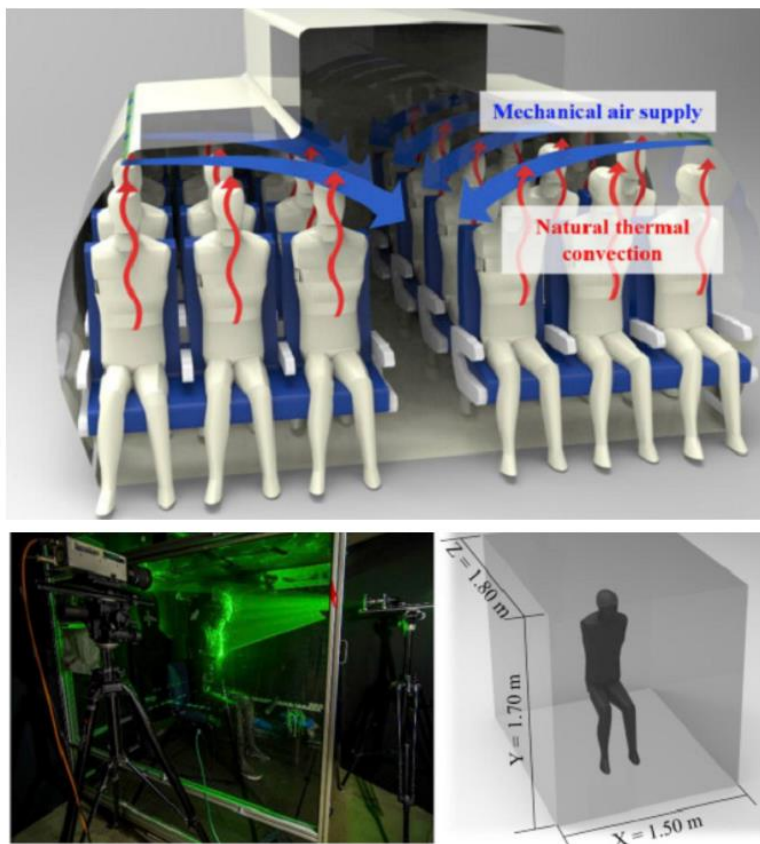


Рис. 4 – Экспериментальная схема кабины и пассажира [27]
Fig. 4 - Experimental scheme of the cabin and passenger [27]

В ряде исследований рассматриваются панельные радиаторы. Из-за разницы температур между окружающим воздухом и поверхностями отопительного прибора возникают потоки, вызываемые естественной конвекцией, вокруг радиатора и над ним. Чтобы поддерживать комфортные условия в помещении, важно понимать параметры потока нагретого воздуха над радиатором [32–34].

Исследователи из ЦАГИ сделали оценку применимости использования результатов измерения полей скоростей методом PIV для получения аэродинамических сил, действующих на профиль крыла. Для расчетов использовался метод контрольного объема, основанный на интегрировании газодинамических переменных вдоль замкнутого контура вокруг профиля. Проведено сравнение результатов с измерениями коэффициента подъемной силы по распределению давления на поверхности модели и коэффициента профильного сопротивления на основе дефекта полного давления в следе за моделью. Сравнение показало хорошее соответствие результатов измерений коэффициента подъемной силы с помощью метода контрольного объема и по распределению давления по поверхности модели. Относительная невязка здесь составляет менее 2% на углах атаки до 10%. Анализ результатов измерений показал, что расчет коэффициента сопротивления по дефекту скорости в следе дает более приемлемый результат по сравнению с методом контрольного объема. Средняя невязка с результатами измерений дефекта полного давления в следе составляет менее 3.2%. Погрешность измерений подъемной силы и сопротивления с помощью системы PIV составила менее 3.5%.

Учёные из Польши представили результаты исследований обтекания многороторного самолета. Исследование состояло из анализа поля скоростей с помощью велосиметрии по изображению частиц. На основании испытаний, проведенных в аэродинамической трубе, определено распределение скорости и ее составляющих в вертикальной плоскости, проходящей через ось винта, для нескольких значений угла атаки исследуемой модели. Определение значения скорости в зависимости от координат принятой системы отсчета позволило определить дальность воздействия горизонтальных винтов и фюзеляжа объекта исследования. Испытания позволили также провести количественный и качественный анализ воздушного потока через горизонтальный ротор. Углом атаки самолета называют угол между направлением скорости набегающего потока и хордой крыла.

Помимо обтекания корпусов автомобилей и самолетов, ученые проявили интерес к обтеканию тела человека, погруженного в воду. Эти знания необходимы для спасателей на воде и чемпионов-пловцов [35–38].

Современная океанология также успешно пользуется PIV-технологией с целью моделирования геофизических процессов [39–43]. Описан эксперимент по моделированию процесса загрязнения подводными системами сброса сточных вод прибрежной зоны океана. Во второй части работы представлено исследование параметров течения в турбулентном пограничном слое воздушного потока над взволнованной поверхностью.

Для опор мостов используются свайные фундаменты, но данная конструкция радикально изменяет местное поле потока, возникает усиленная гидродинамическая сила, вызывающая размыв дна вокруг свай. Сильный размыв снижает устойчивость конструкции и даже приводит к ее разрушению [39, 40, 44]. Благодаря своевременному использованию 2D и 3D метода цифровой трассерной визуализации возможно избежать таких последствий.

В литературе представлен ряд работ, в которых описывается изучение течения в воздухе, вызванного коронным разрядом, так называемый электрический ветер (ЭВ). Изучены и построены поля скоростей электрического ветра в системах электродов игла–тор, провод–плоскость при разных напряжениях и полярностях коронирующего электрода с применением трассерной визуализации PIV. Проведен анализ структуры электрического ветра в различных условиях и взаимосвязи характера ЭВ со структурой чехла коронного разряда.

В последние годы технология PIV активно применяется для изучения процессов формирования струй, их движения, а также распада потоков распыленной жидкости в сфере пожаротушения. Эти знания крайне необходимы для локализации очагов возгорания и ликвидации пламени. В работе [45] изучаются огненные вихри, которые образуются при лесных пожарах.

Нельзя недооценивать важность передовой трассерной технологии и в области медицины. В работе [46] поднята очень актуальная тема - распространение вируса гриппа по воздуху при кашле. При помощи PIV исследована скорость кашля.

4 Conclusions / Заключение

Particle Image Velocimetry (PIV) метод является бесконтактным и обладает простой калибровкой. Экспериментальное моделирование турбулентных течений и диагностика оптико-лазерными методами делает возможным получение достоверных количественных данных об исследуемых физических процессах с контролируемой погрешностью измерений.

В работе выполнен комплексный анализ применения PIV. Многочисленные примеры использования инновационного метода подтверждают его эффективность. В частности, интерес к моделированию динамики потоков был проявлен отраслью, занимающейся ветроэлектроэнергетикой; авиапромышленностью, конструкторами и расчетчиками опор мостов; инженерами, разрабатывающими системы вентиляции, отопления и пожаротушения в здании и многими другими.

Сделав анализ научных трудов, можно заключить, что статей по теме тепло-массопереноса в фасадных конструкциях с использованием Particle Image Velocimetry не обнаружено. Применение PIV-технологии в совокупности с классическим теплотехническим расчетом позволило бы исключить неточности в определении сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций и помогло бы в выборе системы отопления, а также дало бы возможность свести к минимуму количество участков с возможным появлением конденсации. Данному вопросу необходимо уделить должное внимание в дальнейших работах.

References

1. Cano, S., Sierra, J., Múnera, J., Hincapie, D. Determination of velocity fields using the PIV technique. 2019 22nd Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision, STSIVA 2019 - Conference Proceedings. 2019. DOI:10.1109/STSIVA.2019.8730268.
2. Wegfrass, A., Lobutova, E., Resagk, C. Application of 3D particle tracking velocimetry in convection. Springer Proceedings in Physics. 2012. 141. Pp. 297–300. DOI:10.1007/978-3-642-28968-2_63. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-28968-2_63 (date of application: 20.10.2020).
3. Harris, J., Smith, B.L., Wilson, B. Investigation of relative importance of some error sources in particle image velocimetry. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM. 2012. 2. Pp. 1–11. DOI:10.1115/FEDSM2012-72442.
4. Adamczyk, A.A., Rimai, L. 2-Dimensional particle tracking velocimetry (PTV): Technique and image processing algorithms. Experiments in Fluids. 1988. 6(6). Pp. 373–380. DOI:10.1007/BF00196482.
5. Adrian, R.J. Twenty years of particle image velocimetry. Experiments in Fluids. 2005. 39(2). Pp. 159–169. DOI:10.1007/s00348-005-0991-7.
6. Wang, H., He, G., Wang, S. Globally optimized cross-correlation for particle image velocimetry. Experiments in Fluids. 2020. 61(11). Pp. 1–17. DOI:10.1007/s00348-020-03062-x. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-020-03062-x> (date of application: 19.10.2020).
7. Oberlack, M., Peinke, J., Talamelli, A., Castillo, L., Hölling, M. Eds. Progress in Turbulence and Wind Energy IV. 141. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN:978-3-642-28967-5.
8. Kamada, Y., Li, Q., Maeda, T., Yamada, K. Wind tunnel experimental investigation of flow field around two-dimensional single hill models. Renewable Energy. 2019. 136. Pp. 1107–1118. DOI:10.1016/j.renene.2018.09.083.
9. Jeon, S., Kim, B., Huh, J. Comparison and verification of wake models in an onshore wind farm considering single wake condition of the 2 MW wind turbine. Energy. 2015. 93. Pp. 1769–1777. DOI:10.1016/j.energy.2015.09.086.
10. Berg, J., Mann, J., Bechmann, A., Courtney, M.S., Jørgensen, H.E. The Bolund Experiment, Part I: Flow Over a Steep, Three-Dimensional Hill. Boundary-Layer Meteorology. 2011. 141(2). Pp. 219–243. DOI:10.1007/s10546-011-9636-y. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10546-011-9636-y> (date of application: 10.10.2020).
11. Cao, S., Wang, T., Ge, Y., Tamura, Y. Numerical study on turbulent boundary layers over two-dimensional hills - Effects of surface roughness and slope. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2012. 104–106. Pp. 342–349. DOI:10.1016/j.jweia.2012.02.022.
12. Smith, S.E., Travis, K.N., Djeridi, H., Obligado, M., Cal, R.B. Dynamic effects of inertial particles

- on the wake recovery of a model wind turbine. *Renewable Energy*. 2021. 164. Pp. 346–361. DOI:10.1016/j.renene.2020.09.037.
13. Akon, A.F., Kopp, G.A. Turbulence structure and similarity in the separated flow above a low building in the atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. 182. Pp. 87–100. DOI:10.1016/j.jweia.2018.09.016.
 14. Chen, B., Shang, L., Qin, M., Chen, X., Yang, Q. Wind interference effects of high-rise building on low-rise building with flat roof. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. 183. Pp. 88–113. DOI:10.1016/j.jweia.2018.10.019.
 15. Guirguisa, N.M., Abd El-Aziz, A.A., Nassief, M.M. Study of wind effects on different buildings of pitched roofs. *Desalination*. 2007. 209(1-3 SPEC. ISS.). Pp. 190–198. DOI:10.1016/j.desal.2007.04.028.
 16. Huang, P., Peng, X., Gu, M. Aerodynamic devices to mitigate rooftop suction on a gable roof building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014. 135. Pp. 90–104. DOI:10.1016/j.jweia.2014.10.015.
 17. Liu, Z., Yu, Z., Chen, X., Cao, R., Zhu, F. An investigation on external airflow around low-rise building with various roof types: PIV measurements and LES simulations. *Building and Environment*. 2020. 169. Pp. 106583. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106583. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106583> (date of application: 8.10.2020).
 18. Yin, S., Fan, Y., Li, Y., Sandberg, M., Lam, K. ming. Experimental study of thermal plumes generated by a cluster of high-rise compact buildings under moderate background wind conditions. *Building and Environment*. 2020. 181. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.107076.
 19. Kim, B., Tse, K.T., Yoshida, A., Tamura, Y., Chen, Z., Van Phuc, P., Park, H.S. Statistical analysis of wind-induced pressure fields and PIV measurements on two buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019. 188. Pp. 161–174. DOI:10.1016/j.jweia.2019.01.016. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.01.016> (date of application: 20.10.2020).
 20. Xu, K.W., Zhang, Y., Liu, D., Azman, A.N., Kim, H.B. Slug flow development study in a horizontal pipe using particle image velocimetry. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. 162. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120267.
 21. Mahgoub, A.O., Ghani, S., Rashwan, M.M., Ismail, S.M., ElBialy, E.A. Simulation of spectators' aerodynamic drag using porous models approximation. *Building and Environment*. 2020. 184. Pp. 107248. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.107248.
 22. Launder, B.E., Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1974. 3(2). Pp. 269–289. DOI:10.1016/0045-7825(74)90029-2.
 23. Zhang, H., Dai, L., Xu, G., Li, Y., Chen, W., Tao, W. Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part II: Simulation results and discussion. *Applied Thermal Engineering*. 2009. 29(10). Pp. 2028–2036. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2008.10.006.
 24. Lee, J.P., Kim, H.L., Lee, S.J. Large-scale PIV measurements of ventilation flow inside the passenger compartment of a real car. *Journal of Visualization*. 2011. 14(4). Pp. 321–329. DOI:10.1007/s12650-011-0095-9.
 25. Conceição, E.Z.E., Silva, M.C.G., Viegas, D.X. Airflow around a passenger seated in a bus. *HVAC and R Research*. 1997. 3(4). Pp. 311–323. DOI:10.1080/10789669.1997.10391380.
 26. Fišer, J., Jícha, M. Impact of air distribution system on quality of ventilation in small aircraft cabin. *Building and Environment*. 2013. 69. Pp. 171–182. DOI:10.1016/j.buildenv.2013.08.007.
 27. Li, J., Cao, X., Liu, J., Mohanarangam, K., Yang, W. PIV measurement of human thermal convection flow in a simplified vehicle cabin. *Building and Environment*. 2018. 144. Pp. 305–315. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.08.031.
 28. Bosbach, J., Lange, S., Dehne, T., Lauenroth, G., Hesselbach, F., Allzeit, M. Alternative ventilation concepts for aircraft cabins. *CEAS Aeronautical Journal*. 2013. 4(3). Pp. 301–313. DOI:10.1007/s13272-013-0074-z.
 29. Zítek, P., Vyhliđal, T., Simeunović, G., Nováková, L., Čížek, J. Novel personalized and humidified air supply for airliner passengers. *Building and Environment*. 2010. 45(11). Pp. 2345–2353. DOI:10.1016/j.buildenv.2010.04.005.
 30. Gao, N.P., Niu, J.L. Personalized ventilation for commercial aircraft cabins. *Journal of Aircraft*. 2008. 45(2). Pp. 508–512. DOI:10.2514/1.30272.

31. Shehadi, M., Jones, B., Hosni, M. Characterization of the frequency and nature of bleed air contamination events in commercial aircraft. *Indoor Air*. 2016. 26(3). Pp. 478–488. DOI:10.1111/ina.12211.
32. Calisir, T., Yazar, H.O., Baskaya, S. Evaluation of flow field over panel radiators to investigate the effect of different convector geometries. *Journal of Building Engineering*. 2021. 33. DOI:10.1016/j.jobe.2020.101600.
33. Sarbu, I., Sebarchievici, C. A study of the performances of low-temperature heating systems. *Energy Efficiency*. 2015. 8(3). Pp. 609–627. DOI:10.1007/s12053-014-9312-4.
34. Ploskić, A., Wang, Q., Sadrizadeh, S. A holistic performance evaluation of ventilation radiators – An assessment according to EN 442-2 using numerical simulations. *Journal of Building Engineering*. 2019. 25. DOI:10.1016/j.jobe.2019.100818.
35. Chen, G. Bin, Chen, W.L., Gao, D.L., Yang, Z.F. Active control of flow structure and unsteady aerodynamic force of box girder with leading-edge suction and trailing-edge jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2021. 120. Pp. 110244. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2020.110244.
36. Takagi, H., Nakashima, M., Sato, Y., Matsuuchi, K., Sanders, R.H. Numerical and experimental investigations of human swimming motions. *Journal of Sports Sciences*. 2016. 34(16). Pp. 1564–1580. DOI:10.1080/02640414.2015.1123284. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02640414.2015.1123284> (date of application: 21.10.2020).
37. Cohen, R.C.Z., Cleary, P.W., Mason, B.R. Simulations of dolphin kick swimming using smoothed particle hydrodynamics. *Human Movement Science*. 2012. 31(3). Pp. 604–619. DOI:10.1016/j.humov.2011.06.008.
38. van Houwelingen, J., Kunnen, R.P.J., van de Water, W., Holten, A.P.C., van Heijst, G.J.F., Clercx, H.J.H. Flow visualisation in swimming practice using small air bubbles. *Sports Engineering*. 2019. 22(2). Pp. 1–8. DOI:10.1007/s12283-019-0306-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s12283-019-0306-5> (date of application: 21.10.2020).
39. Jin, T., Liao, Q. Application of large scale PIV in river surface turbulence measurements and water depth estimation. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019. 67. Pp. 142–152. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2019.03.001.
40. Muste, M., Fujita, I., Hauet, A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*. 2008. 46(4). DOI:10.1029/2008WR006950.
41. Legleiter, C.J., Kinzel, P.J., Nelson, J.M. Remote measurement of river discharge using thermal particle image velocimetry (PIV) and various sources of bathymetric information. *Journal of Hydrology*. 2017. 554. Pp. 490–506. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.09.004.
42. Hauet, A., Creutin, J.D., Belleudy, P. Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharge using numerical simulation. *Journal of Hydrology*. 2008. 349(1–2). Pp. 178–190. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.10.062.
43. Kantoush, S.A., Schleiss, A.J., Sumi, T., Murasaki, M. LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. *Journal of Hydro-Environment Research*. 2011. 5(4). Pp. 263–276. DOI:10.1016/j.jher.2011.07.002.
44. Ran, Q.H., Li, W., Liao, Q., Tang, H.L., Wang, M.Y. Application of an automated LSPIV system in a mountainous stream for continuous flood flow measurements. *Hydrological Processes*. 2016. 30(17). Pp. 3014–3029. DOI:10.1002/hyp.10836.
45. Hartl, K.A., Smits, A.J. Stereo PIV measurements in fire whirls. *Experiments in Fluids*. 2019. 60(1). Pp. 1–16. DOI:10.1007/s00348-018-2661-6. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-018-2661-6> (date of application: 20.10.2020).
46. Dudalski, N., Mohamed, A., Mubareka, S., Bi, R., Zhang, C., Savory, E. Experimental investigation of far-field human cough airflows from healthy and influenza-infected subjects. *Indoor Air*. 2020. 30(5). Pp. 966–977. DOI:10.1111/ina.12680. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12680> (date of application: 21.10.2020).