

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2021.2.07
УДК 617–089.844



УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ, СКОРОСТИ И ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА, ОБРАЗУЕМОГО ПРИ КАШЛЕ И ЧИХАНИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ (В РАМКАХ ПРОГРАММЫ БОРЬБЫ С COVID-19)

Н.А. Парфентьева¹, Н.А. Парфентьев²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, e-mail: ParfentevaNA@mgsu.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Российская Федерация, 119361, Москва, ул. Озерная, 46, e-mail: nik_parfenium@mail.ru

Аннотация. Признано, что *Covid-19* в основном передается воздушно-капельным путем. Особенно опасно чихание и кашель больного, когда вместе со струей воздуха, движущейся с большой скоростью (при чихании скорость воздушного потока может быть около 150 км/ч), вылетают капельки жидкости, содержащие вирусы. Для создания физической и численной моделей, описывающих эти процессы, и расчетов концентрации аэрозольных частиц не хватает экспериментальных данных. Дается описание установки для оценки изменяющегося со временем распределения скоростей и изменения формы аэрозольного облака, возникающего при кашле и чихании. Предлагаемый экспериментальный метод позволяет получать данные о распределении относительных скоростей при однократном акте выделения воздуха. Эти данные затем калибруются по измерениям абсолютной скорости с помощью датчика с низкой чувствительностью, устанавливаемого вблизи источника. Целью проводимых исследований является определение направления и скорости движения облака, несущего капли с вирусом, а также времени его прохождения мимо потенциальных реципиентов. По этим данным можно оценить полученную дозу инфекции и зависимость этой дозы от расстояния между источником и человеком, находящимся недалеко от него. Исследование не претендует на полноту, которая может быть достигнута при изучении больших групп испытуемых, но после его завершения сможет служить исходным материалом для приближенных к реальности цифровых моделей передачи инфекции. Работа содержит также предварительные результаты первого цикла экспериментов на этой установке. На основе полученных результатов даются практические рекомендации, направленные на противодействие распространению инфекции.

Ключевые слова: аэрозоль, модель, датчик, концентрация, скорость, опыт, вирус, температура, течение.

ВВЕДЕНИЕ

Заболевший опасным вирусом человек является «пульсирующим» и меняющим свою мощность источником, создающим при кашле и особенно при чихании движущееся с большой скоростью аэрозольное облако, которое имеет температуру и плотность выдыхаемого воздуха. Построение физической модели этих процессов является достаточно сложной задачей. Так, в частности, из-за конечного времени процесса не

© Парфентьева Н.А., Парфентьев Н.А., 2021

Парфентьева Наталья Андреевна, к.ф.-м.н., доцент, заведующая кафедрой физики и строительной аэродинамики, Москва

Парфентьев Николай Андреевич, к.ф.-м.н., доцент, с.н.с., Москва

может быть применена хорошо разработанная теория струйных течений. Дело в том, что относительно низкая скорость и невысокая разность температур мешают применить ее выводы в данном случае, так как помимо физических здесь присутствуют специфические биологические процессы. Хотя существует много работ [8, 9, 11, 12, 16, 17, 21], описывающих процессы распространения инфекции на основе математических моделей процессов, дополнительные экспериментальные исследования представляются весьма важными. Медицинские исследования также дают слишком мало информации, которая позволила бы точно оценить скорость распространения и форму «искусственных» аэрозольных облаков, несущих угрозу распространения инфекции. Знания этого рода позволят преодолеть многие предрассудки и выработать практические рекомендации по стратегии выживания в условиях глобальной пандемии. Конечной целью работы является практическое изучение процесса передачи инфекции воздушно-капельным путем, так как именно этот путь, по признанию многих ученых, и есть наиболее вероятный способ заражения. Безусловно, подобные исследования должны быть проведены с большими группами испытуемых для получения достоверных статистических данных, и только такие результаты позволят дать достаточно точные рекомендации поведения людей в условиях глобального распространения инфекции.

ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ «ИСКУССТВЕННЫХ» ОБЛАКОВ

Параметры движения и изменения формы аэрозольного облака можно экспериментально изучать следующими методами:

- 1) измерением распределения скоростей с помощью микроэлектронно-механических систем (МЭМС) повышенной чувствительности;
- 2) измерением распределения температуры в выдыхаемом облаке с помощью тепловизионной техники [6, 10];
- 3) температурными измерениями структуры аэрозольного облака с помощью сети микротермометров [3];
- 4) механическими 3-мерными измерениями распределения скорости облака микроанемометрами повышенной чувствительности [1].

Магистральное движение микроэлектронной техники привело к созданию уникальных микроэлектромеханических датчиков. Однако низкая чувствительность современных датчиков не позволяет использовать их для поставленной специфической задачи. Скорее всего, подобные задачи в прошлом не представляли практического интереса. Зато теперь, уже в недалеком будущем, при очевидной их актуальности они естественным образом займут подобающее место, но такие разработки потребуют дополнительных средств и достаточно длительного времени.

Тепловизионное оборудование, позволяющее измерять пространственное распределение температуры воздуха, имеет очень высокую стоимость и доступно только избранным высокотехнологичным лабораториям. К тому же требующееся для «модели заражения» распределение скоростей получается только косвенным путем на основе температурных измерений. Это относится также и к прямым измерениям температуры с помощью микродатчиков.

Практически для начала исследований оставалась лишь одна возможность – разработка собственной сети многочисленных механических микроанемометров повышенной чувствительности.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На основании изложенного авторами был предложен метод измерений относительной скорости элементов воздушного потока с помощью установки,

представленной в данной работе. При этом из-за вариабельности объема и скорости аэрозольного облака была разработана схема, позволяющая получать двумерное распределение относительной скорости в двух плоскостях, расположенных на разном удалении от источника. Для создания картины зависимости относительной скорости от расстояния проведен ряд экспериментов с этими плоскостями, располагаемыми на выбранном ряде расстояний от источника аэрозольных облаков. Затем проводилась абсолютная калибровка скорости полученного распределения относительной скорости с помощью анемометра низкой чувствительности, располагаемого на близком расстоянии от источника облака.

В качестве анемометрического датчика высокой чувствительности использовались небольшие треугольные бумажные флажки, подвешенные на горизонтальных шелковых нитях, которые были натянуты на двух прямоугольных рамах (рис. 1). Снимок рам сделан на белом фоне, реально в эксперименте за рамами находилось свободное пространство. Рамы устанавливались друг за другом на одной линии с испытуемым, при этом на дальней раме флажки имели большую длину, а следовательно, и меньшую чувствительность. Для определения относительной чувствительности флажков на установку с малыми флажками по центру подвешивалось несколько флажков большего размера.

Движение и отклонение флажков регистрировались четырьмя видеокамерами, поставленными по периметру установки на одинаковой высоте. Общий вид установки представлена на рис. 2.



Рис. 1. Анемометрический датчик высокой чувствительности из треугольных бумажных флажков

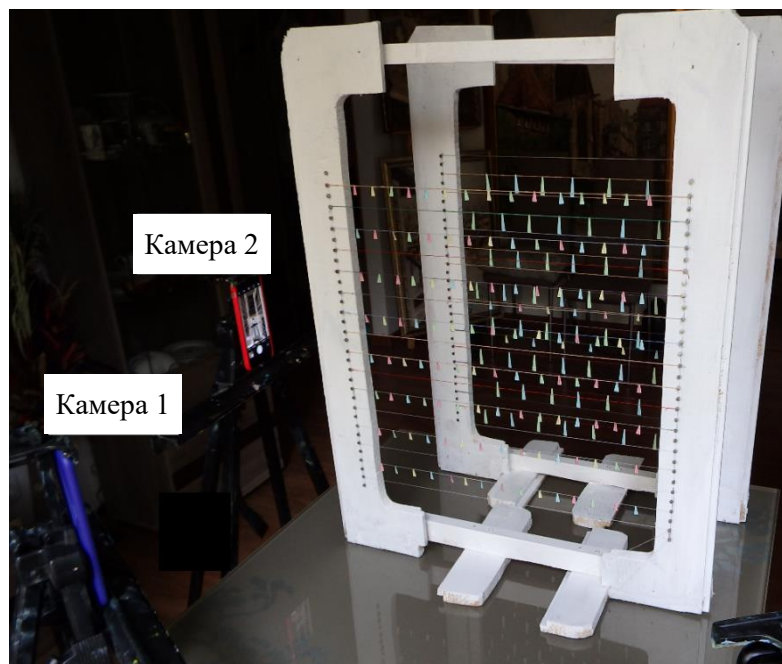


Рис. 2. Общий вид установки

Камеры были установлены с левой и правой сторон каждой из панелей (на рисунке показаны только две камеры с левой стороны), что позволяло частично компенсировать проективное уменьшение видимых размеров флажков.

Данные видеосъемки затем передавались в компьютер, для которого одним из авторов статьи была создана специфическая программа обработки видеоизображений.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

С помощью этой программы на первом шаге рассчитывалось проективное искажение каждого датчика.

На втором шаге для каждого флажка вычислялось:

- 1) проективное восстановление положения в неподвижном состоянии;
- 2) определение максимального отклонения флажка;
- 3) расчет относительной максимальной скорости флажков, расположенных на ближайшей к испытываемой панели камере;
- 4) расчет относительной чувствительности датчиков разной величины, расположенных рядом на первой панели;
- 5) расчет общего времени реакции датчика на эпизодическое воздействие;
- 6) на основе данных относительной чувствительности датчиков (п. 4) расчет относительной скорости воздуха на второй панели (п. 2, 3 и 5.)

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ВЫЧИСЛЕНИЯ СКОРОСТИ ОБЛАКА ПО ОТКЛОНЕНИЮ ДАТЧИКА

Нами был теоретически обоснован метод определения относительной скорости воздуха, несущего аэрозольные частицы, по величине отклонений датчиков (флажков) от вертикального положения.

В случае, когда течение газа ламинарное и отклонение флажка происходит под действием силы давления падающего воздуха, отклонение подвешенного флажка от вертикали не зависит от его формы.

Считалось, что реакция датчика вызвана двумя причинами:

- 1) действием давления падающей струи воздуха;

2) разностью давлений на передней и задней поверхностях акселерометрического датчика.

При этом импульс силы, действующей на флажки, не зависел прямо пропорционально от площади их поверхности.

Обычно считается, что сила, действующая на плоскую пластину [4, 13, 14, 18, 19], определяется по формуле

$$F = CS\rho v^2 / 2 ,$$

где коэффициент C зависит от формы тела, которая в свою очередь определяет структуру потока за объектом. Теоретически этот коэффициент можно приближенно рассчитать только в частных случаях. Как правило, для разных обтекаемых форм он определяется экспериментально.

За флажком образуются вихри, при этом давление за флажком уменьшается, что вызывает дополнительное отклонение флажка под действием разности давлений. Большой флажок вызывает большую турбулентность потока, чем малый при одинаковых скоростях падающего потока. Эмпирическое значение коэффициента определялось по сравнительному отклонению соседних (т.е. находящихся в потоках с разной скоростью) датчиков.

Использование датчиков разной площади поверхности, но подобной формы (и, следовательно, чувствительности) позволяло получить данные о снижении относительной скорости аэрозольного облака при его удалении от источника.

После абсолютной калибровки относительного распределения скоростей искусственного облака методом трехмерного интегрирования получают изменение объема облака со временем, изменение концентрации со временем, зависимость времени распространения от расстояния до реципиента, длительность прохода облака в зоне реципиента, примерную общую дозу полученных им аэрозольных капель.

ДААННЫЕ ПЕРВОГО ЦИКЛА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Предварительные опыты с кашляющим испытуемым

Первые опыты с кашляющим испытуемым дали парадоксальные результаты. Было обнаружено, что аэрозольное облако при кашле не распространяется по горизонтальной оси, выходящей из центра рта прямо сидящего человека. Эксперимент показал, что центральная ось движения облака, как правило, наклонена вниз под углом от 10 до 40 градусов. Угловое распределение скорости облака при кашле подвержено сильным вариациям и зависит от формы рта и, возможно, положения языка в гортани. Эти результаты имеют практическое значение. При кашле, если человек хочет защитить окружающих, ему следует первым делом закрывать нижнюю часть рта, препятствуя активному движению облака. Надежные измерения углового распределения скорости облака должны быть проведены с большой группой испытуемых. Среднее угловое распределение скорости облака, выходящего при кашле, соответствует примерно 30–50 градусам.

При проведении опыта положение человека или прибора, имитирующего кашель или чихание, оставалось постоянным. Изменялись положения датчиков, это позволяло определить область движения воздуха.

Расчеты показывают, что облако выдыхаемого воздуха достаточно быстро освобождается от капель слюны; так, капли размером 50 мкм оседают с высоты 2 м за несколько секунд. Капли меньшего размера оседают медленнее, но в них меньше вирусов. При создании математической модели движения капель учитывались сила

тяжести, выталкивающая сила и сила вязкости. Сложность в том, что капля участвует в двух независимых движениях – ее увлекает воздушный поток благодаря действию силы вязкости, и она падает вниз под действием указанных трех сил. Решение осложняется еще и тем, что диаметр капли меняется вследствие испарения, поэтому строгая оценка ее движения должна учитывать и этот факт.

Предварительные опыты с чихающим испытуемым

Из-за высокой скорости облака при чихании первая панель должна была быть отнесена на расстояние не менее 0,5–1 м. При чихании струя воздуха, как правило, имеет относительно симметричную форму, близкую к конусоидальной, и практически воспроизводится от одного опыта к другому. Угол наклона оси, как правило, менее 20 градусов. Угловое распределение скорости облака составляет величину от 35 до 50 градусов. Предварительная оценка времени распространения на расстояние порядка 1 м составляет 0,2 с.

Таким образом, уже можно рекомендовать защищать рот при чихании. Отметим, что чихание зараженного вирусом человека представляет опасность для окружающих даже в открытом пространстве, если последние находятся на расстоянии ближе 4–5 м и не имеют средств защиты.

В последующих экспериментах предполагается более точное определение скорости и углового распределения потока искусственного аэрозольного облака, на основе которого будет повышена точность определения скорости распространения облака и изменения концентрации аэрозоля с расстоянием.

Выводы

Разработана достаточно простая установка для измерения углового распределения относительной скорости искусственного аэрозольного облака и изменения относительной скорости в зависимости от расстояния от источника заражения.

Выработаны методика измерения скорости распространения искусственного воздушного потока, метод абсолютной калибровки распределения относительной скорости. Получены результаты первых исследований, где источниками облаков были люди с искусственно стимулированным чиханием. На основе измерения скоростей произведена оценка времени распространения облака, равная 0,2 с.

На основании предварительного цикла экспериментов уже выработаны практические рекомендации, рассчитанные на уменьшение вероятности распространения опасной инфекции.

В дальнейших исследованиях предполагается теоретический анализ углового распределения концентрации водяных микрокапель в воздушном облаке и изменения концентрации капель в зависимости от расстояния между источником и реципиентом, длительности прохождения облака в зоне реципиента и получаемой им дозы аэрозольных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Н.В., Кравцов В.Г., Назаров О.И., Панкратов А.К., Вожаев Е.С., Вялков А.В., Головкин М.А., Ефремов А.А. Системы измерения воздушных параметров полета нового поколения // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 8. – С. 3.
2. Береснев С.А., Грязин В.И. Физика атмосферных аэрозолей: курс лекций. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. – 228 с.
3. Желамский М.В. Электромагнитное позиционирование подвижных объектов. – М.: Физматлит, 2013. – 320 с.

4. Оглоблин Г.В., Бревнов Д. Моделирование обтекания тел воздушным потоком с помощью жидкокристаллического детектора [Электронный ресурс]. – URL: www.econf.rae.ru/article/5757 (дата обращения: 28.09.2020).
5. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
6. Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // Инженерный физический журнал. – 2010. – № 5. – С. 829–836.
7. Asadi S., Bouvier N., Wexler A.S., Ristenpart W.D. The coronavirus pandemic and aerosols: does COVID-19 transmit via expiratory particles? // *Aerosol Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 54, no. 6. – P. 635–638. DOI: 10.1080/02786826.2020.1749229
8. Bourouiba L. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions potential implications for reducing transmission of Covid-19 // *JAMA.* – 2020. – Vol. 323, no. 18. – P. 1837–1838. DOI: 10.1001/jama.2020.4756
9. Bourouiba L., Dehandshoewercker E., Bush J.W.M. Violent respiratory events: on coughing and sneezing // *J. Fluid Mech.* – 2014. – Vol. 745. – P. 537–563. DOI: 10.1080/02786826.2020.1749229
10. Brus D., Hyvarinen A., Zdimal V., Lihavainen H. Homogeneous nucleation rate measurements of 1-butanol in helium: A comparative study of a thermal cloud chamber and a laminar flow diffusion chamber // *J. Chem. Phys.* – 2005. – Vol. 122. – P. 214506.
11. Bush J.W.M., Thurber B.A., Blanchette F. Particle clouds in homogeneous and stratified environments // *J. Fluid Mech.* – 2003. – Vol. 489. – P. 29–54. DOI: 10.1017/S0022112003005160
12. Guo Z.-D., Wang Z.-Y., Zhang S.-F., Li X., Li L., Li C., Cui Y., Fu R.-B., Dong Y.-Z., Chi X.-Y., Zhang M.-Y., Liu K., Cao C., Liu B., Zhang K., Gao Y.-W., Lu B., Chen W. Aerosol and surface distribution of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 in hospital wards, Wuhan, China. 2020 // *Emerg. Infect. Dis.* – 2020. – Vol. 26, no. 7. – P. 1586–1591. DOI: 10.3201/eid2607.200885
13. Hwang D. Review of research into the concept of the microblowing technique for turbulent skin friction reduction // *Prog. Aerosp. Sci.* – 2004. – Vol. 40, no. 8. – P. 559–575.
14. Li J., Lee C.-H., Jia L., Li X. Numerical study on the flow control by micro-blowing // *Proc. of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting.* – 2009. – Paper No. 2009–779.
15. Luo L., Liu D., Liao X.-L., Wu X.-B., Jing Q.-L., Zheng J.-Z., Liu F.-H., Yang S.-G., Bi B., Li Z.-H., Liu J.-P., Song W.-Q., Zhu W., Wang Z.-H., Zhang X.-R., Chen P.-L., Liu H.-M., Cheng X., Cai M.-C., Huang Q.-M., Yang P., Yang X.-F., Han Z.-G., Tang J.-L., Ma Y., Mao C. Modes of contact and risk of transmission in COVID-19 among close contacts (pre-print), available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.03.24.20042606v1> (accessed: 30 March 2021). DOI: 10.1101/2020.03.24.20042606.
16. Santarpia J.L., Rivera D.N., Herrera V., Morwitzer M.J., Creager H., Santarpia G.W., Crown K.K., Brett-Major D.M., Schnaubelt E., Broadhurst M.J., Lawler J.V., Reid S.P., Lowe J.J. Transmission potential of SARS-CoV-2 in viral shedding observed at the University of Nebraska Medical Center // *Scientific Reports.* – 2020. – Vol. 10, no. 1. – P. 12732. DOI: 10.1101/2020.03.23.20039446
17. Scharfman B.E., Techet A.H., Bush J.W.M., Bourouiba L. Visualization of sneeze ejecta: steps of fluid fragmentation leading to respiratory droplets // *Exp. Fluids.* – 2016. – Vol. 57. – Article No. 24. DOI: 10.1007/s00348-015-2078-4
18. Stadnytskyi V., Bax C.E., Bax A., Anfinrud P. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission // *PNAS.* – 2020. – Vol. 117, no. 22. – P. 11875–11877. DOI: 10.1073/pnas.2006874117
19. Tillman T.G., Hwang D.P. Drag reduction on a large-scale nacelle using a microblowing technique // *Proc. of the 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* – 1999. – Paper No. 1999–0130.
20. Van Doremalen N., Bushmaker T., Morris D.H., Holbrook M.G., Gamble A., Williamson B.N., Tamin A., Harcourt J.L., Thornburg N.J., Gerber S.I., Lloyd-Smith J.O., De Wit E., Munster V.J. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1 // *N. Engl. J. Med.* – 2020. – Vol. 382, no. 16. – P. 1564–1567. DOI: 10.1056/NEJMc2004973
21. Yan J., Grantham M., Pantelic J., Bueno de Mesquita P.J., Albert B., Liu F., Ehrman S., Milton Donald K., EMIT Consortium. Infectious virus in exhaled breath of symptomatic seasonal influenza cases from a college community // *PNAS.* – 2018. – Vol. 115, no. 5. – P. 1081–1086. DOI: 10.1073/pnas.1716561115

INSTALLATION FOR DETERMINING THE DIRECTION, VELOCITY AND TIME OF PASSAGE OF AN AEROSOL CLOUD FORMED DURING COUGHING AND SNEEZING: WORK RESULTS (AS PART OF THE COVID-19 PROGRAM)

N.A. Parfentyeva, N.A. Parfentyev (Moscow, Russian Federation)

It is recognized that Covid-19 is mainly transmitted by airborne droplets. It is especially dangerous to sneeze and cough the patient, when together with a jet of air, moving at a high speed (when sneezing up to 150 km/h), droplets of liquid containing viruses fly out. It is known that even with a loud conversation the patient can release up to 1000 drops in the air with particles of a new type of coronavirus, especially coughing and sneezing carrier of the virus. There is a lack of experimental data to create physical and numerical models describing these processes and calculate the concentration of aerosol particles. The paper proposes an installation to determine the distribution of velocities and deformations in the time of the aerosol cloud that occurs when coughing and sneezing, as well as preliminary results of the first cycle of experiments at this installation. Based on the results, recommendations are made to counter the spread of infection. The purpose of these studies is to determine the direction and speed of the cloud carrying the droplets with the virus, as well as the time of its passage past potential recipients. Based on these data, it will be possible to estimate the received dose of infection and the dependence of this dose on the distance between the source and the potential victim. The study does not claim to be complete, which can be achieved by studying large groups of subjects, but after its completion it can serve as a source material for close to reality digital models of infection transmission. The work also contains preliminary results of the first cycle of experiments at this facility. On the basis of the results obtained, practical recommendations are given to counteract the spread of infection.

Key words: aerosol, model, sensor, concentration, speed, experience, virus, temperature, current.

Получено 1 апреля 2021