

УДК 536.244; 621.512-222

Определение локальной концентрации загрязняющих частиц в «чистых помещениях»

Д-р техн. наук Григорьев А.Ю. augrig@bk.ru

Канд. техн. наук Григорьев К.А. KGrigoriev@uelements.com

Гриневич Б.С. borisgrin1@yandex.ru, **Медведева К.А.** s-o-s@bk.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Роль помещений, оснащенных системами особой очистки воздуха, постоянно растет и очень важна во многих отраслях, в том числе в электронике, пищевой отрасли, фармацевтике, медицине и др. Определить работоспособность «чистого помещения» можно только при его наличии, но такие эксперименты стоят дорого, требуя большое количество материальных средств и времени на их проведение. Существующие в настоящее время методики проектирования «чистых помещений», не учитывают существенную неоднородность по пространству концентрации загрязняющих частиц, что приводит к необоснованному завышению стоимости каждого метра помещения. В данной работе сделаны предпосылки создания математической модели, позволяющей определять локальную концентрацию загрязняющих частиц по пространству помещения с течением времени. Это позволит упростить задачу проверки работоспособности чистых помещений еще на этапе их проектирования. В основу предлагаемой математической модели изучения движения воздуха с аэрозольными (загрязняющими) частицами положены уравнения Навье-Стокса и уравнение изменения химической компоненты. Новизна модели заключается в попытке описать локализованную подачу чистого воздуха и определению поля загрязняющих аэрозольных частиц по объему помещения. В работе так же представлены начальные и граничные условия задачи.

Ключевые слова: чистые помещения, двухфазные течения, аэро- и массообмен, моделирование процессов, начальные и граничные условия.

DOI:10.17586/2310-1148-2016-9-3-1-4

Definition of local concentration of the polluting particles in «pure rooms»

D.Sc. Grigoriev A.Yu. augrig@bk.ru

Ph.D. Grigoriev K.A. KGrigoriev@uelements.com

Grinevich B.S. borisgrin1@yandex.ru, **Medvedeva K.A.** s-o-s@bk.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The role of the rooms equipped with systems of special purification of air constantly grows and is very important in many branches, including in electronics, food branch, pharmaceuticals, medicine, etc. It is possible to define operability of «the pure room» only at his existence, but such experiments cost much, demanding a large number of appliances and time for their carrying out. The design techniques of "pure rooms" existing now, don't consider essential heterogeneity on space of concentration of the polluting particles that leads to unreasonable overestimate of cost of each meter of the room. In this work prerequisites of creation of the mathematical model allowing to determine local concentration of the polluting particles by room space eventually are made. It will allow to simplify a problem of check of operability of pure rooms at a stage of their design. Navier-Stokes's equations and the equation of change chemical components are the basis for the offered mathematical model of studying of the movement of air with the aerosol (polluting) particles. Novelty of model consists in attempt to describe the localized giving of clean air and to definition of the field of the polluting aerosol particles on room volume. In work initial and boundary statements of the problem are also presented.

Keywords: pure rooms, two-phase currents, aero - and mass exchange, modeling of processes, entry and boundary conditions.

«Чистые помещения» – это помещения, в которых контролируется концентрация аэрозольных загрязняющих частиц. Они специально построенные и эксплуатируемые так, чтобы свести к минимуму

поступление, генерацию и накопление таких частиц внутри помещений. В таких помещениях, при необходимости, так же могут контролироваться такие параметры воздуха, как температура, влажность, давление и др.

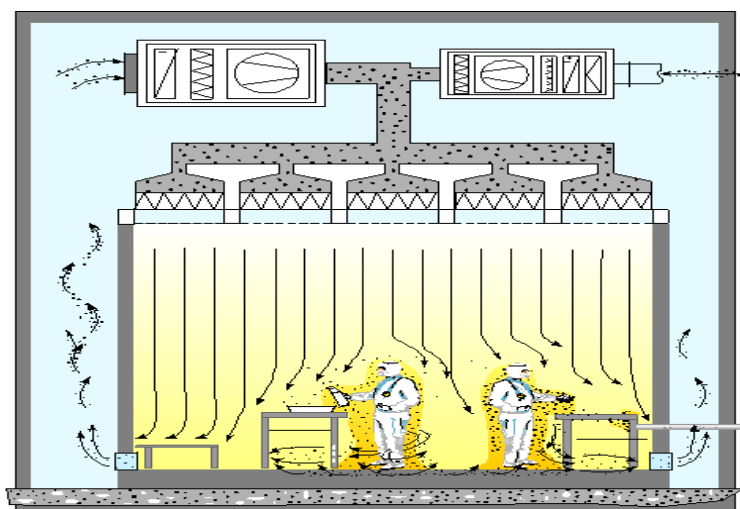


Рис. 1. Пример чистого помещения

Роль помещений оснащенных системами особой очистки постоянно растет и очень важна в настоящее время. Создание новых технологий в электронике, пищевой отрасли, качественной фармацевтической продукции, проведение сложных медицинских операций и др., все это требует создание помещений с особой, заданной чистотой воздуха по пространству помещения. Зачастую определить работоспособность «чистого помещения» можно только при его наличии, но такие эксперименты стоят дорого, требуя большое количество дорогостоящих материальных средств и времени на их проведение. Существующие в настоящее время методики проектирования «чистых помещений» [1–3], не учитывают существенную неоднородность по пространству концентрации загрязняющих частиц.

Создание математической модели, позволяющей определять локальную концентрацию загрязняющих частиц по пространству помещения с течением времени [4], упрощает задачу проверки работоспособности чистых помещений на этапе их проектирования.

В основу предлагаемой математической модели изучения движения воздуха с аэрозольными (загрязняющими) частицами будут положены уравнения Навье-Стокса. Новизна модели заключается в попытке описать локализованную подачу чистого воздуха и определению поля загрязняющих аэрозольных частиц по объему помещения. Это позволит оптимизировать энергозатраты, а также определить концентрацию загрязняющих аэрозольных частиц вблизи объекта, для которого создано данное чистое помещение (операционный стол и пациент, производство фармацевтической продукции, электроники и др.).

Уравнения Навье-Стокса получены при следующих допущениях:

1. Газ совершенен, процесс течения изотермичен:

$$\frac{p}{\rho} = Const, \quad (1)$$

где p – давление, ρ – плотность воздуха.

2. Течение газа подчиняется обобщенному закону Ньютона о линейной связи между тензором напряжений и тензором скоростей деформаций.

3. Динамический коэффициент вязкости μ воздуха принимаем постоянным.

4. Коэффициенты теплоемкости C_p и C_v являются его физическими константами.

Чтобы замкнуть систему уравнений (так как скорости течения воздуха в «чистых помещениях» с учетом требования комфортности малы), используем уравнение не сжимаемости газа:

$$\text{div} \vec{V} = 0. \quad (2)$$

Так как числа Рейнольдса (Re) течения газа, в помещениях оборудованных установками очистки воздуха, превышают критические значения, то течение газа носит турбулентный характер.

Осредненное турбулентное течение газа описывается уравнениями Рейнольдса, которые выводятся при известных допущениях [5].

При выделении осредненного движения газа, действительное турбулентное течение, с его хаотически переплетающимися линиями тока, сводится к некоторому упорядоченному течению и так называемому турбулентному или молярному перемешиванию.

Турбулентное перемешивание представляет собой перенос из слоя в слой осредненного течения частичек или, как их еще называют, молей газа, в связи с чем, происходит перенос из слоя в слой количества движения, тепла, вещества газа и аэрозольных загрязняющих частиц. Согласно гипотезе Буссинеска, для турбулентного переноса справедливы законы ламинарного течения газа, записанные для осредненного упорядоченного потока.

Поэтому, если обозначить через μ_t – коэффициент турбулентного переноса количества движения, то для касательного напряжения трения τ будем иметь:

$$\tau = -\overline{\rho u'v'} = \mu_t \frac{d\bar{u}}{dy}. \quad (3)$$

Значение τ выведено для простейшего случая плоского осредненного течения газа.

Для определения концентрации загрязняющих аэрозольных частиц по объему помещения используется уравнение изменения химической компоненты:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot m_i) + \text{div}(\rho \cdot \vec{V} \cdot m_i) = 0, \quad (4)$$

где m_i – массовая концентрация аэрозольных частиц (отношение массы частиц в данном объеме к полной массе в том же объеме).

Таким образом, для нахождения неизвестных параметров течения газа u, v, p, ρ, m_i будет составлена система дифференциальных уравнений описывающих течение газа и концентрацию аэрозольных частиц в помещениях. Поставленная задача является статически определимой. Значения μ_t найдутся из одной из имеющихся теорий турбулентности течения газа, определится с выбором которой [6–10], можно будет в процессе проведения численного эксперимента и сравнения результатов с данными натурного эксперимента.

Для решения задачи необходимо определится с начальными и граничными условиями течения воздуха в «чистом помещении» с загрязняющими аэрозольными частицами.

В начальный момент времени предполагается, что установка очистки воздуха не работает и все параметры газа (воздуха) и концентрация аэрозольных частиц по пространству помещения однородны, газ покоится. Из сечения определенного размера на одной из границ помещения начинает поступать воздух с заданными параметрами по скорости течения, температуре, плотности, давлению газа и концентрации аэрозольных частиц.

Граничные условия. Стенки помещения неподвижные, непроницаемые (кроме специальных технологических окон для выхода газа, известного местоположения). Температура стенок со временем не меняется.

Литература

1. Чистые помещения. / Под ред. А. Е. Федотова. Второе издание, перераб. и доп. – М.: АСИНКОМ, 2003. – 576 с.
2. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации. – М.: Клинрум, 2002. – 304 с.
3. Проектирование чистых помещений. / Под ред. В. Уайта. Пер. с англ. – М.: Клинрум, 2004. – 360 с.
4. Григорьев А.Ю., Трикоза О.О. Аэро-термодинамическая модель двухфазного нестационарного течения газа в помещениях, оборудованных установками по очистке воздуха. Материалы IV МНТК «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». г. С-Петербург. 25–27 ноября 2009г. – С. 105–107. СПб УНиПТ.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука. - 2003 г., – С. 848, ил.
6. Латин Ю.В. Статистическая теория турбулентности: прошлое и настоящее (краткий очерк идей). // Научно-технические ведомости. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2(36)/2004. С. 7–20.

7. Гуляев А.Н., Козлов В.Е., Секундов А.Н. К созданию универсальной однопараметрической модели для турбулентной вязкости. //Механика жидкости и газа. № 4. 1993. –С. 69–81.
8. Лапин Ю.В., Нехамкина О.А., Стрелец М.Х. Многопараметрическая алгебраическая модель турбулентного установившегося течения в круглой трубе с песочной шероховатостью. //ТВТ. 1995. Т. 33. № 5. – С. 731–737.
9. Shur M., Strelets M., Secundov A. and al. Comparative Numerical Testing of One- and Two-Equation Turbulence Models for Flows with Separation and Reattachment // AIAA Paper. 1995. p. 1995-0863.
10. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // La Rech. Aerospaciale. 1994. № 1. p. 5.

References

1. Pure rooms. / Under the editorship of A. E. Fedotov. Second edition, revised and additional – M.: ASINKOM, 2003. – 576 p.
2. Whyte V. Technology of pure rooms. Bases of design, tests and operation. – M.: Klinrum, 2002. – 304 p.
3. Design of pure rooms. / Under the editorship of V. Whyte. The lane with English – M.: Klinrum, 2004. – 360 p.
4. Grigoriev A. Yu., Trikoza O. O. Aero-thermodynamic model of a two-phase non-stationary current of gas in the rooms equipped with installations on purification of air. Materials IV MNTK "Low-temperature and Food Technologies in the 21st Century". St.-Petersburg. On November 25–27, 2009 – P. 105-107.
5. Loytsyansky L. G. Mechanics of liquid and gas. – M.: Science. – 2003, – P. 848, silt.
6. Lapin Yu. V. Statistical theory of turbulence: the past and the present (short sketch of the ideas). //Scientific and technical sheets. The St. Petersburg state polytechnical university. 2(36)/2004, – P. 7–20.
7. Gulyaev A. N., Kozlov V. E., Sekundov A. N. To creation of universal one-parametrical model for turbulent viscosity. //Mechanics of liquid and gas. No. 4, 1993, – P. 69–81.
8. Lapin Yu. V., Nekhamkina O. A., M. H Sagittarius. Multiple parameter algebraic model of the turbulent established flow in a round pipe with a sand roughness. //TVT. 1995. T. 33. No. 5. – P. 731–737.
9. Shur M., Strelets M., Secundov A. and al. Comparative Numerical Testing of One-and Two-Equation Turbulence Models for Flows with Separation and Reattachment//AIAA Paper. 1995. p. 1995–0863.
10. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows//La Rech. Aerospaciale. 1994. No. 1. p. 5.

Статья поступила в редакцию 09.08.2016 г.