

2. Kadiev P.A., Kadiev I.P., Zejnalov M.Z. Algorithms of transformation of «classical» matrixes in two-index latin squares. Vestnik DSTU, Technical science, № 17, 2010. – pp. 45-49.

3. Kadiev I.P., Kadiev P.A. About one class of combinatory configurations. Vestnik DSTU, Technical science, № 31, 2013. – pp. 45-49.

4. Kadiev P.A., Zejnalov M.Z. Program for transformation matrices by Latin squares. State registration of computer programs certificate № 2009616143 from 09.11.2009.

**УДК 697.9**

*Марченко А.С., Сулин А.Б.*

## **ЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

*Marchenko A.S., Sulin A.B.*

## **LOGIC SIMULATION OF LIFE SUPPORT SYSTEM COMPONENT IN REAL TIME**

*Аннотация.* В статье предложено использование методологии имитационного моделирования для оценки эффективности ступенчатого регулирования скорости вращения двигателя вентилятора при поддержании в заданных границах объемного расхода воздуха системы «вентилятор-фильтр». Приведен подробный алгоритм работы программы, составленной на основе прикладного пакета Anu Logic. Анализируется возможность использования предложенного метода при проектировании систем вентиляции. Предложенная в статье методика позволяет на этапе проектирования определить максимальные интервалы замены фильтрующих элементов систем, а также спрогнозировать время необходимого переключения скоростей работы двигателя вентилятора. Использование методики позволяет отказаться от сложных систем поддержания постоянного расхода воздуха и максимально увеличить срок службы комплекта фильтрующих элементов.

Методика логического моделирования процессов позволяет снизить затраты на строительство и повысить энергоэффективность зданий.

**Ключевые слова:** системы вентиляции, системы очистки воздуха, имитационное моделирование, характеристика сети.

**Abstract.** The article proposed the use of simulation methods for evaluating the effectiveness of a stepped fan engine speed control while maintaining the air flow

*volume in the set boundaries of the «fan-filter» system. A detailed algorithm of the program made on the basis of an Any Logic software package. Is analyzed the possibility of using the proposed method in the design of ventilation systems.*

*The proposed method allows at the design stage to determine the maximum replacement intervals of the systems filter elements, as well as to predict the time to switch the fan motor speeds. Using of the technique allows to refuse the complex air flow systems and maximize the life of the filter elements set.*

*Methods of logical processes modeling allows to reduce construction costs and improve energy efficiency of buildings.*

**Key words:** *ventilation systems, air purification systems, simulation, network characteristic.*

**Введение.** Капитальные затраты, осуществляемые на создание и поддержание системы жизнеобеспечения современных зданий, рассчитанных на одновременное пребывание в них большого количества людей, исчисляются суммами, которые по своим величинам часто сопоставимы со стоимостью строительства самого здания. К основным системам жизнеобеспечения, без которых практически невозможно представить, например, современный бизнес-центр, относятся системы отопления, холодоснабжения, вентиляции и прочие. Для северных регионов России, в которых стоимость таких систем значительно выше в связи с продолжительностью отопительного сезона, вопрос оптимизации затрат на приобретение, монтаж и последующую эксплуатацию оборудования стоит особенно остро, о чем свидетельствуют как постоянно увеличивающееся число предложений на основе, так называемых, «зеленых» или энергоэффективных технологий, так и неизменно растущий спрос на них со стороны строителей [1].

**Постановка задачи.** Любые энергоэффективные решения предполагают под собой минимизацию затрат ресурсов, среди которых особенно нужно выделить электроэнергию, необходимую для функционирования систем вентиляции и холодоснабжения, а так же топливо для нагрева теплоносителя в холодный период года.

Если экономию топлива на нагрев теплоносителя в холодный период года можно обеспечить, например, хорошими показателями теплоизоляции стен, перекрытий и непосредственно трубопроводов, то для оптимизации затрат на систему вентиляции здания, которая в балансе энергетических затрат часто составляет до 30% от общего энергопотребления, приходится искать другие пути, среди которых можно выделить, например, разработку систем с переменным расходом воздуха, реагирующих на изменение концентрации CO<sub>2</sub> в воздушной среде помещений, проектирование систем с минимальной длиной воздухопроводов и минимальными скоростями движения воздуха и прочие [2,3]. Все эти способы уменьшения расходов на системы вентиляции зданий являются дорогостоящи-

ми, поэтому целесообразность их применения необходимо подтверждать технико-экономическим расчетом.

Однако существуют и другие, более простые способы снижения капитальных и эксплуатационных затрат на системы вентиляции, один из которых будет описан ниже.

Одной из проблем современных больших городов является огромное содержание в их воздушной среде разнородной пыли. При анализе в ней можно обнаружить как частицы песка из пустыни Сахара, так и различные следы разрушительной для окружающей среды деятельности человека [4]. Например, в последние десятилетия фиксируется значительный рост концентрации копоти и пыли от тормозных колодок и шин различных автотранспортных средств в воздухе городов [5].

Оседание пыли на фильтрах вентиляционных систем отрицательно влияет на расход воздуха, что влечет за собой необходимость увеличения производительности и, как следствие, энергопотребления двигателей вентиляторов. Для жилых и административных помещений проблема стоит не столь остро, так как падение расхода воздуха между регламентными заменами фильтров не оказывает серьезного влияния на самочувствие людей.

Иначе дело обстоит для различных вредных производств, где падение расхода воздуха через систему вентиляции или местный отсос может привести к отравлению или временной потере трудоспособности сотрудников [6], что неприемлемо, поэтому необходима установка дополнительного оборудования и электроники, в задачи которой входит контроль за расходом воздуха. Возможным путем решения данной проблемы может быть установка специальных клапанов с переменным сопротивлением, или системы автоматического плавного регулирования расхода воздуха, но их использование ведет к значительному удорожанию системы, как в части оборудования, так и в части его автоматизации. Для случаев, когда приемлемо изменение расхода воздуха в определенных пределах, например от 1500 м<sup>3</sup>/ч до 2000 м<sup>3</sup>/ч, а его запыленность является постоянной величиной, возможно использование методики, изложенной ниже. Ее особенностью является возможность на этапе проектирования системы оценить временные промежутки между заменами воздушных фильтров, тем самым продлив их «жизненные циклы» и избежав лишних затрат на сложную автоматизацию системы. Двигатель вентилятора при этом оснащен ступенчатым регулятором производительности, который переключается на следующую ступень при засорении фильтра и падении расхода воздуха до уровня нижнего предела.

Далее приведен алгоритм расчета простейшей системы жизнеобеспечения, состоящей из радиального вентилятора и карманного фильтра.

**Методы исследования.** Для решения поставленной задачи необходимо использовать инструмент, позволяющий производить математическое моделирование системы в режиме реального времени. Методология имитационного

моделирования с применением таких программных продуктов как MvStudium, MATLAB, Arena, GPSS, Extend, iThink Analyst, Process Model, AnyLogic и др. является самым современным подходом к анализу поведения систем в режимах реального, ускоренного и замедленного времени.

В данном исследовании на примере системы «вентилятор – фильтр» анализируются возможности программного пакета AnyLogic [7-10], позволяющего разрабатывать динамические, дискретно-событийные и агентные имитационные модели, описывающие практически любой реальный процесс.

Для построения модели принимаются следующие исходные данные: приемлемый расход воздуха системы вентиляции составляет  $1500 \text{ м}^3/\text{ч} - 2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , эффективность карманного фильтра составляет 90%, запыленность воздуха на входе в систему составляет  $2,5 \text{ мг на } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха}$ .

При построении модели используются характеристики радиального вентилятора и канального карманного фильтра.

Математическая модель описываемого элемента системы жизнеобеспечения предполагает работу вентилятора на первой скорости вращения двигателя до тех пор, пока расход воздуха через него за счет засорения фильтра не опустится до нижней допустимой границы в  $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

После достижения этого значения двигатель вентилятора переключается на более высокую вторую скорость вращения, что влечет за собой увеличение расхода. Далее, по мере засорения фильтра, двигатель вентилятора переходит на третью скорость вращения. Достижение на третьей скорости вращения двигателя вентилятора расхода воздуха  $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$  означает необходимость замены фильтра.

В блоке 2 (рисунок 1) происходит ввод начального значения расхода вентилятора с чистым фильтром ( $L01$ ). Далее из расходно-напорных характеристик для каждой скорости вращения двигателя вентилятора необходимо получить зависимости полного давления вентилятора от расхода воздуха в виде  $P_i = f(L_i)$  и обратную ей зависимость расхода воздуха от давления  $L_i = f^{-1}(P_i)$ , где  $i$  – ступень вращения двигателя вентилятора, выраженные в виде полинома второй степени.

Для первой скорости вращения двигателя через динамическую переменную, описываемую функцией  $P01=f(L01)$ , в блоке 3 происходит расчет начальной рабочей точки системы, соответствующей полностью чистому фильтру вентилятора.

Так как перемещаемая среда характеризуется высоким содержанием пыли, то в процессе работы происходит постоянное засорение фильтра, и, как следствие, снижение расхода воздуха через систему. Блок-схема данного процесса выглядит следующим образом (рис. 1):

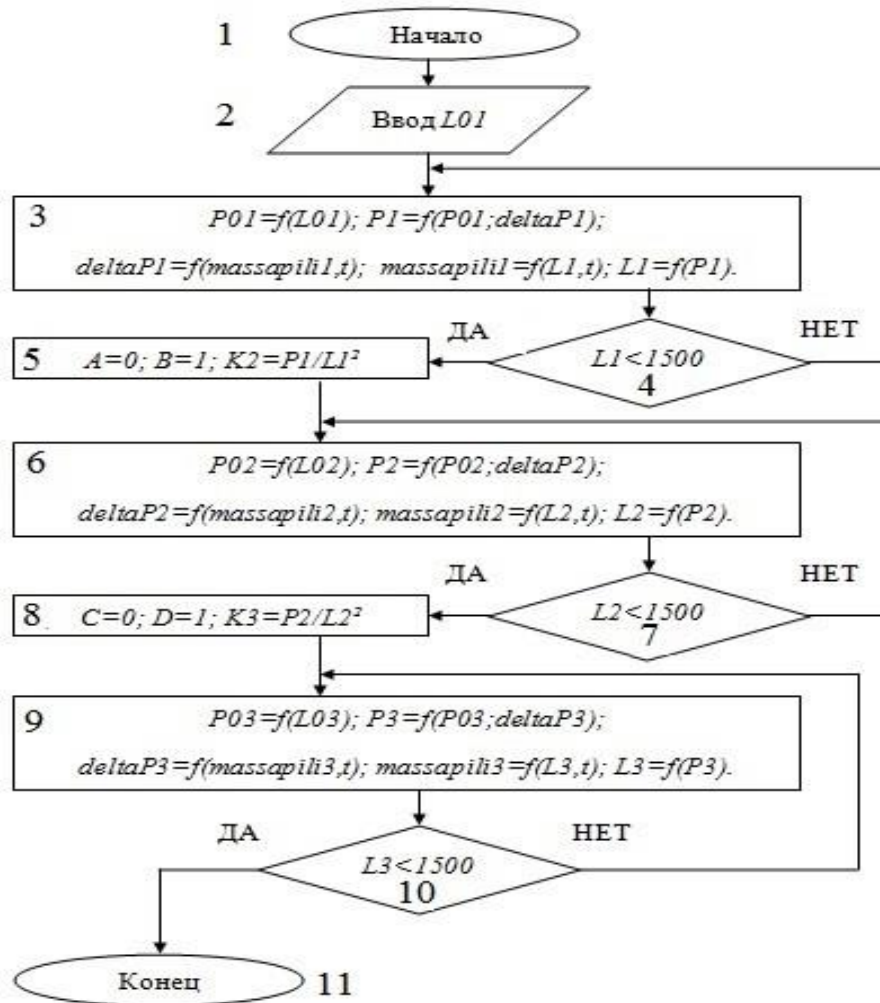


Рисунок 1 – Блок–схема программы расчета системы «вентилятор-фильтр»

Для оценки величины этого снижения в накопителе  $massapili1$  в каждый момент времени рассчитывается количество задержанной в фильтре пыли с учетом его эффективности:

$$massapili1_j = massapili1_{j-1} + \Delta massapili = massapili1_{j-1} + L1_j \times m_p \times ef,$$

где:  $j$  – время эксперимента, с;

$massapili1_{j-1}$  – масса пыли, осевшей в фильтре в предыдущий момент времени, кг;

$\Delta massapili$  – масса пыли, осевшей в фильтре за 1 секунду, кг;

$L1_j$  – фактический расход воздуха с учетом засоренности фильтра в момент времени  $j$  на первой скорости, м<sup>3</sup>/ч;

$m_p$  – масса пыли, содержащейся в 1 м<sup>3</sup> воздуха, кг;

$ef = 0,9$  – эффективность фильтра.

Сопротивление засоренного фильтра рассчитывается по формуле

$$P1 = P01 + \Delta P1,$$

где  $\Delta P1$  – прирост сопротивления фильтра за счет его засоренности.

При этом зависимость увеличения сопротивления фильтра от массы осевшей в нем пыли принимается линейной.

Накопитель  $\Delta P_1$  в каждый момент времени рассчитывается следующим образом:

$$\Delta P_{1j} = \Delta P_{1j-1} + \Delta \Delta P_1 = \Delta P_{1j-1} + r \times massapili_j,$$

где:  $j$  – время эксперимента, с;

$\Delta P_{1j-1}$  – прирост аэродинамического сопротивления фильтра в предыдущий момент времени относительно сопротивления чистого фильтра, Па;

$\Delta \Delta P_1$  – прирост аэродинамического сопротивления фильтра за 1с;

$\Delta P_{1j}$  – прирост аэродинамического сопротивления фильтра относительно сопротивления чистого фильтра в момент времени  $j$  на первой скорости вращения двигателя вентилятора, Па;

$massapili_j$  – масса пыли, осевшей в фильтре в момент времени  $j$ , кг;

$r$  – коэффициент, зависящий от типа фильтра.

Расчеты для второй и третьей скоростей вращения двигателя проводятся аналогичным образом.

При достижении минимально допустимого расхода на первой и второй скоростях вращения двигателей вентиляторов происходит переход с конечной рабочей точки.

Переход с конечной рабочей точки на первой скорости вращения двигателя вентилятора на начальную рабочую точку на второй скорости и с конечной рабочей точки на второй скорости на начальную рабочую точку на третьей, происходит по кривой (характеристике сети), описываемой уравнением [2]:

$$P = k \times L^2,$$

Где  $k$ -коэффициент характеристики сети, рассчитываемый для конечно рабочей точки на первой скорости вращения двигателя вентилятора и начальной рабочей точки для второй скорости, по формуле:

$$k_2 = P_1 / L_1^2,$$

а для конечной рабочей точки на второй скорости вращения двигателя вентилятора и для начальной рабочей точки на третьей скорости вращения вентилятора по формуле:

$$k_3 = P_2 / L_2^2.$$

Для переноса блок-схемы расчета в среду программы AnyLogic, необходимо построить логическую цепочку, которая для рассматриваемой задачи имеет следующий вид:

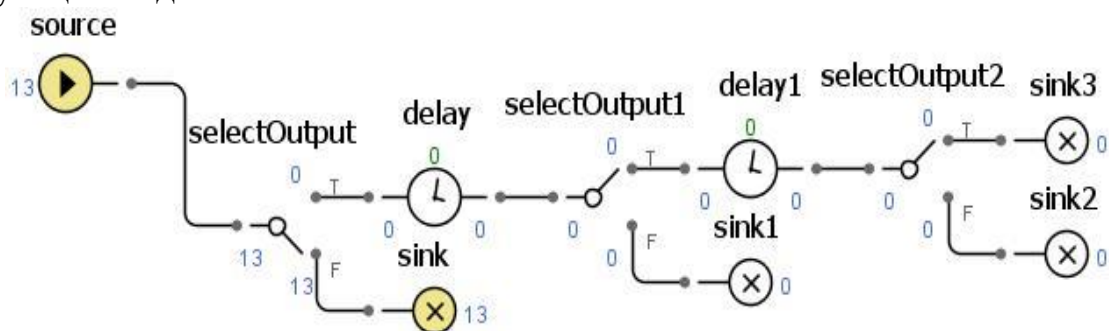


Рисунок 2 – Логическая цепочка рассматриваемых процессов в среде AnyLogic

Блок *source* соответствует элементу 1 «начало», изображенному на блок-схеме (рис.1). Через определенные промежутки времени он генерирует запросы.

При получении запроса блок *selectOutput* (соответствует элементу 4 блок-схемы) проводит проверку значения параметра *L1* на соответствие условию  $L1 < 1500$ .

При отрицательном ответе запрос уничтожается в блоке *sink*, при положительном переходит в блок *delay* (соответствует элементу 5 блок-схемы), в котором происходит присвоение значений параметрам, отвечающим за переход от расчета системы на первой скорости вращения двигателя на вторую, и расчет коэффициента характеристики сети.

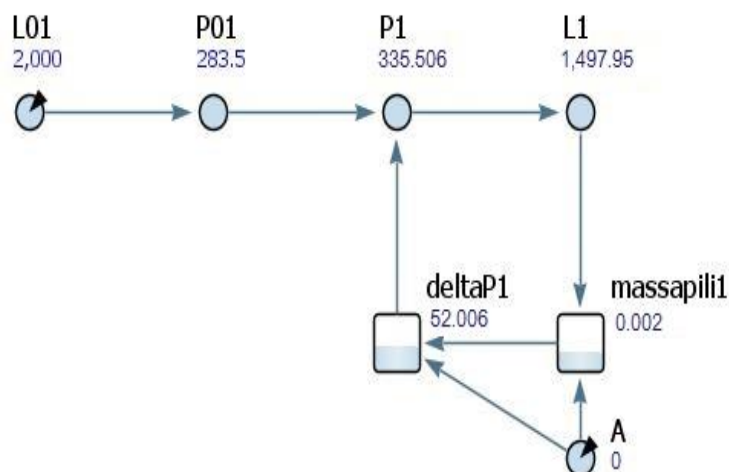
Далее запрос переходит в блок *selectOutput1* (соответствует элементу 7 блок-схемы), в котором происходит проверка элемента *L2* на соответствие условию  $L2 < 1500$ .

При отрицательном ответе запрос уничтожается, при положительном переходит в блок *delay1* (соответствует элементу 8 блок-схемы), в котором происходит присвоение значений параметрам, отвечающим за переход от расчета системы на второй скорости вращения двигателя на третью и расчет коэффициента характеристики сети.

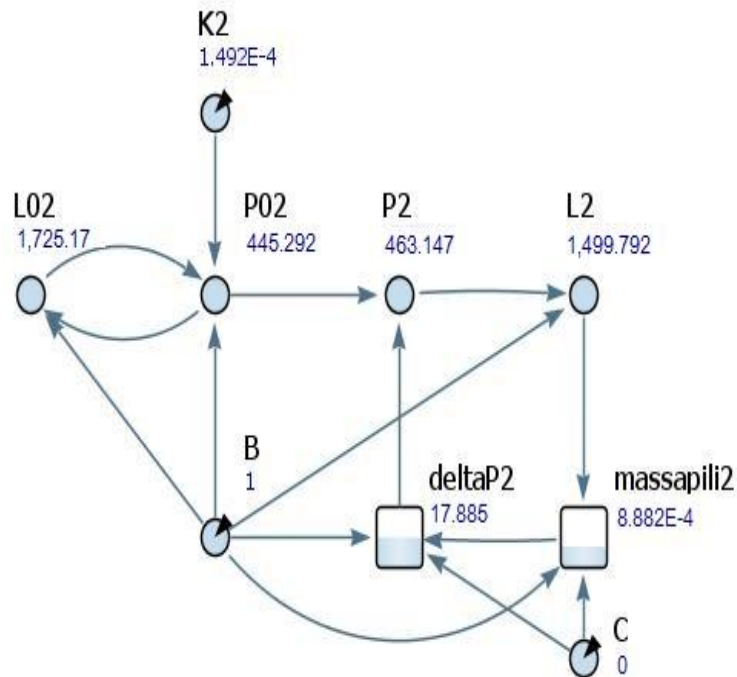
Далее запрос переходит в блок *selectOutput2* (соответствует элементу 10 блок-схемы), в котором происходит проверка элемента *L3* на соответствие условию  $L3 < 1500$ .

При отрицательном ответе запрос уничтожается, при положительном – расчет останавливается, что для реальной системы означает необходимость замены сильно засорившегося фильтра системы вентиляции.

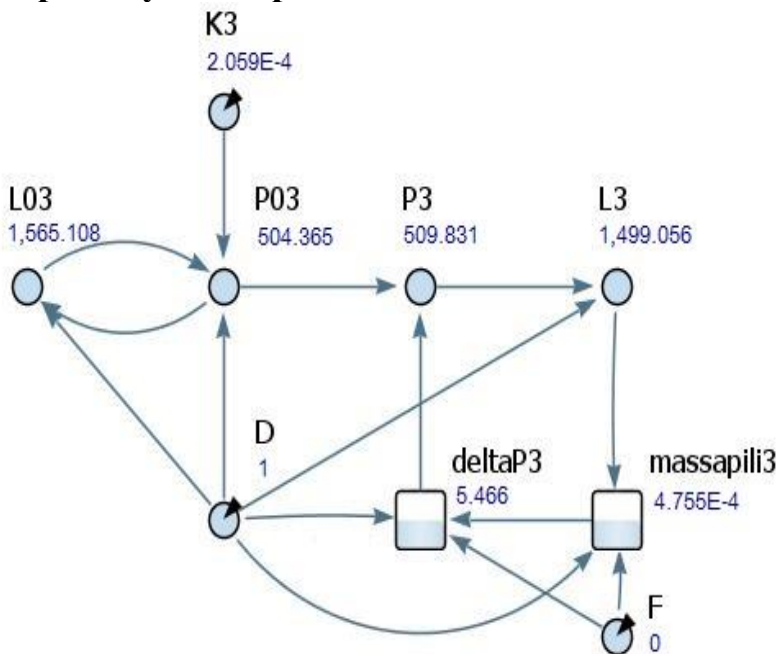
**Обсуждение результатов.** Завершенные эксперименты имитационного моделирования приведены на рис. 3-5. Как видно из рисунка 3, расход воздуха на первой скорости вращения двигателя вентилятора изменялся от 2000 до 1497,95 м<sup>3</sup>/ч.



**Рисунок 3 – Завершенный эксперимент имитационного моделирования для первой ступени вращения двигателя вентилятора**



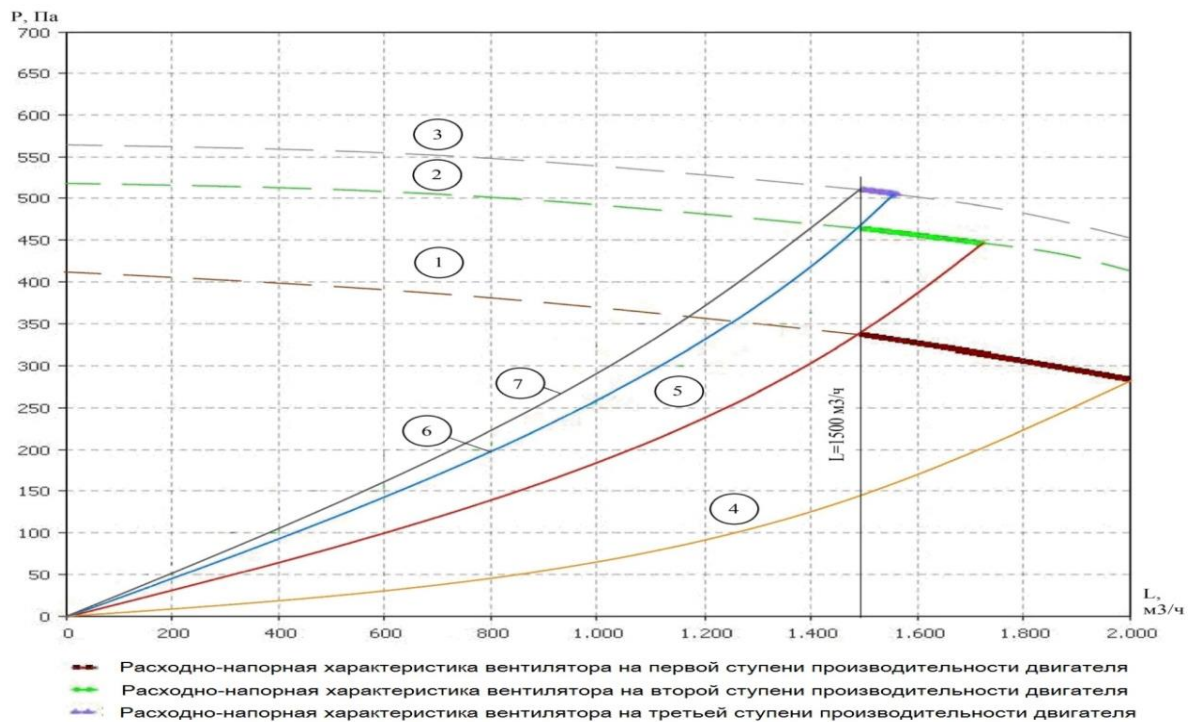
**Рисунок 4 – Завершенный эксперимент имитационного моделирования для второй ступени вращения двигателя вентилятора**



**Рисунок 5 – Завершенный эксперимент имитационного моделирования для третьей ступени вращения двигателя вентилятора**

Так как все процессы в программе происходят в режиме реального времени, то существует возможность построения графика, наглядно иллюстрирующего поведение системы.





**Рисунок 6 – Диаграмма эксперимента, график зависимости объемного расхода воздуха от давления, создаваемого вентилятором**

Здесь линия 4 является характеристикой сети для работы вентилятора на первой скорости вращения двигателя. При засорении фильтра происходит смещение рабочей точки по линии 2 в направлении линии 5, являющейся характеристикой сети для конечной рабочей точки вентилятора на первой скорости вращения двигателя и начальной рабочей точкой для второй скорости вращения. Далее процесс движется по линии 2, являющейся напорно-расходной характеристикой вентилятора на второй скорости вращения двигателя до линии 6, являющейся характеристикой сети для конечной рабочей точки вентилятора на второй скорости вращения двигателя и начальной рабочей точки для третьей скорости вращения двигателя. На третьей скорости вращения двигателя вентилятора рабочая точка смещается по линии 3, являющейся расходно-напорной характеристикой вентилятора для третьей скорости вращения двигателя вентилятора до пересечения с линией 7. Эта точка является конечной рабочей точкой системы, что означает необходимость замены фильтра.

**Вывод.** В настоящее время регламенты по периодичности замены фильтрующих элементов в системах вентиляции не предполагают контроля засоренности и проводятся через определенные промежутки времени.

Предложенная в статье методика позволяет на этапе проектирования определить максимальные интервалы замены фильтрующих элементов систем, а также спрогнозировать время необходимого переключения скоростей работы двигателя вентилятора. Методика позволяет сэкономить как капитальные так и эксплуатационные затраты на системы вентиляции, так как дает возможность

отказаться от сложных систем поддержания постоянного расхода воздуха и максимально увеличить срок службы комплекта фильтрующих элементов.

В перспективе данная методика, используемая в данном случае для прогнозирования поведения систем вентиляции, может быть с успехом использована для таких систем жизнеобеспечения зданий, как отопление, холодоснабжение, водоснабжение.

Повсеместное использование методик логического моделирования процессов позволит снизить затраты на строительство и повысить энергоэффективность зданий.

#### **Библиографический список:**

1. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200с.
2. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. СПб.: Авок Северо-запад, 2005. – 399с.
3. Рымкевич А.А. Системный анализ общественной вентиляции и кондиционирования воздуха. СПб.: Авок Северо-запад, 2003.-271с.
4. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с., ил. – (Охрана окружающей среды)
5. Барикаева Н.С., Николенко Д.А. Исследование запыленности городской среды вблизи автомобильных дорог // журнал «Альтернативная энергетика и экология» № 11 (133) 2013, стр. 75-78.
6. Родин А.К. Вентиляция производственных зданий. Учебное пособие / Родин А.К. Саратов. гос. технич. унив-т. Саратов, 1997
7. Маликов Р. Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6: учеб. пособие / Р. Ф. Маликов. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. – 296с.
8. Куприяшкин, А.Г. Основы моделирования систем: учеб. пособие / А.Г. Куприяшкин; Норильский индустр. ин-т. – Норильск: НИИ, 2015. – 135 с.
9. Каменский Д.П. Имитационные модели автоматизации анализа и синтеза проектных решений систем жизнеобеспечения зданий. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – МГСУ, 2011.
10. Боев В. Д., Кирик Д. И., Сыпченко Р. П. Компьютерное моделирование: Пособие для курсового и дипломного проектирования. — СПб.: ВАС, 2011. — 348 с.

#### **References:**

1. Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M., Shilkin N. In. Energy-efficient buildings. – Moscow: AVOK-PRESS, 2003.-200 p.
2. Stephanov E. V. Ventilation and air conditioning. SPb.: AVOK Severo-Zapad, 2005.-399 p.
3. Rymkevich, A. A. System analysis of public ventilation and airconditioning. SPb.: AVOK Severo-Zapad, 2003.-271 p.

4. Pirumov A. I. air Dedusting. – 2nd ed. Rev. And extra – M.: stroiizdat, 1981. – 296 p. – (Environmental protection)
5. Barakaeva N., Nikolenko D. A. a Study of dust go-rodskog environment close to roads. Journal for Alternative energy and ecology № 11 (133) 2013, pp. 75-78.
6. Rodin A. K. Ventilation of industrial buildings. Training Pozo Biya. Rodin A. K. Sarat. state technical. Univ-t Saratov, 1997.
7. Malikov, R. F. Workshop on simulation of complex systems in the environment of AnyLogic 6: proc. Manual. R. F. Malikov. – Ufa: Publishing house bgpu, 2013. – 296 p.
8. Kupryashkina, A. G. Fundamentals of modeling systems: textbook. Manual. A. G. Kudryashkin Norilsk industry. in-so – Norilsk: NII, 2015. – 135 p.
9. Kamensky D. P. Simulation model of automation of the analysis and synthesis of design solutions of the systems of the buildings. The dissertation on competition of a scientific degree Ph. D. –civil engineering, 2011.
10. Boev V. D., Kirik D. I., Sypchenko, R. P. Computer simulation: a Handbook for course and diploma projects. – SPb.: YOU, 2011. – 348 p.