

## Эмуляция процесса осушки поливинилхлорида в среде Omegaland

*Р.Н. Гайнуллин, М. Л. Шустрова, Н. А. Староверова*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань*

**Аннотация:** В статье приведено описание технологического процесса осушки поливинилхлорида и результатов разработки в среде OmegaLand виртуального модуля, эмулирующего данный процесс. Приведена характеристика и функциональная структура процесса осушки поливинилхлорида в сушилке с кипящим слоем, рассмотрены математические модели элементов моделируемой системы, охарактеризован алгоритм их работы. В связи с тем, что в стандартной библиотеке объектов OmegaLand отсутствует аппарат осушки, в работе было принято решение о разработке данного объекта. Разработанная модель сушилки была протестирована в режиме эмуляции технологического процесса осушки поливинилхлорида. Разработка пользовательских моделей, не представленных в стандартной библиотеке среды моделирования OmegaLand, открывает большие возможности в проектировании, настройке и оценке эффективности режимов работы разнообразных технологических объектов.

**Ключевые слова:** математическая модель, осушка, поливинилхлорид, Omegaland, эмулятор, виртуальный тренажёр, сушилка с кипящим слоем

В настоящее время достаточно широкое применение получили виртуальные системы, эмулирующие работу реальных технологических установок. Применяются они как при обучении технологического персонала [1, 2], так и при исследовании функционирования данных систем, в частности, с целью оптимизации режимов их функционирования [3,4].

Перечень современных сред разработки виртуальных тренажеров достаточно велик. Наиболее известными из них можно назвать WinCC (Siemens, Германия), RSView32 (Rockwell Automation, США), Genesis (Iconics, США), Trace mode (AdAstra, Москва). Продукт OmegaLand (Yokogawa, Япония) привлек внимание авторов эргономичностью, широким перечнем модулей технологического оборудования и рабочих сред в составе стандартной библиотеки с возможностью ее расширения собственными разработками, а также возможностью проведения динамического моделирования технологических процессов [5].

Целью данной работы является разработка виртуального модуля, имитирующего работу сушилки с кипящим слоем.

---

Технологическая схема процесса осушки в псевдооживленном слое представлена на рисунке 1. Из камеры сушки (1) высушиваемый материал из бункера (5) с помощью питателя (6) подается в кипящий слой. Сушильный агент (топочный газ) через все отверстия решетки и затем удаляется через верхний патрубок камеры. Затем отработанные газы проходят очистку от пыли в циклоне (12), а также в батарейном пылеуловителе (13), и в дальнейшем могут быть выброшены в атмосферу. Выделенная в системе обычного (12) и батарейного (13) циклонов, мелкая фракция с помощью вертикального шнека подается к месту загрузки и смешивается с влажным материалом [6, 7].

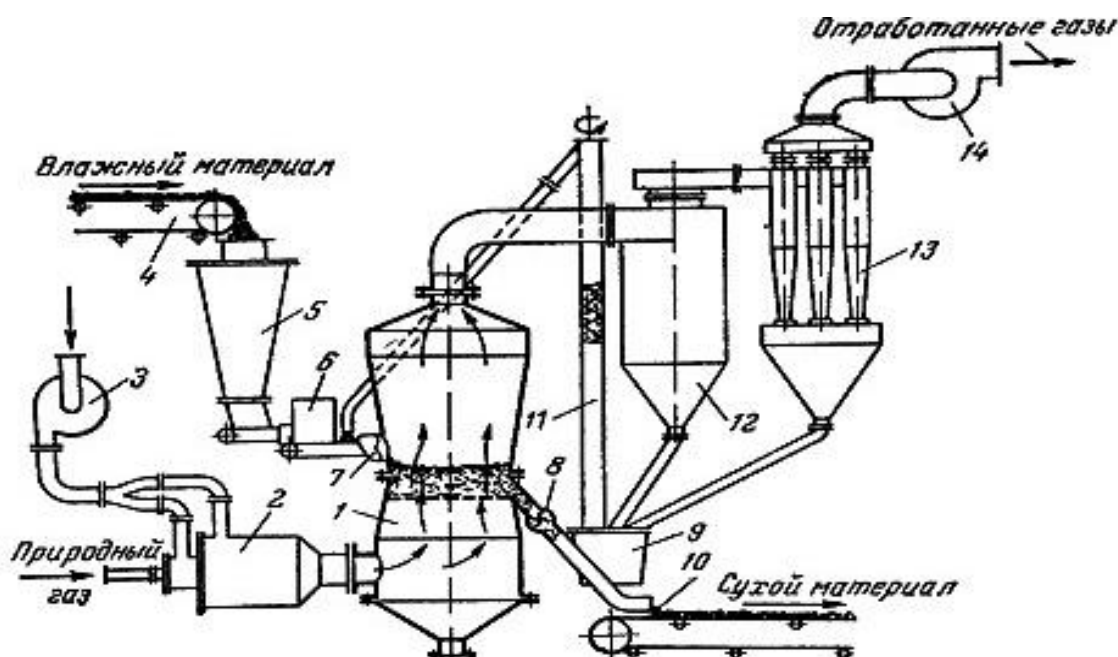


Рис. 1. – Принципиальная схема процесса осушки в псевдооживленном слое.

1 – камера сушки; 2 – топливно-смесительная камера; 3 – вентилятор подачи воздуха; 4 – транспортер влажного материала; 5 – бункер; 6 – питатель; 7 – газораспределительная решетка; 8 – транспортер-разгрузчик; 9 – бункер; 10 – транспортер; 11 – элеватор; 12 – скруббер (циклон); 13 – батарейный пылеуловитель; 14 – вентилятор.

В процессе осушки материалов в сушилке с кипящим слоем (рис. 2а) к уложенному на решётку зернистому материалу, с постепенным увеличением

скорости снизу подводится воздух (рис. 2б), и при некоторой скорости  $u_{всп}$  высота слоя  $H$  начинает расти [8, 9]. В дальнейшем при увеличении значения скорости до  $u'_ч$  (скорость витания слоя), напор достигает максимального значения  $\Delta P_{кр}$ , после чего сопротивление слоя  $\Delta P$  резко падает, а скорость в слое материала  $u_\phi$  увеличивается. Скорость газа, соответствующую точке С и  $u'_{кип}$ , принимается за начало первой стадии псевдооживления. Постепенное увеличение скорости воздуха выше  $u'_{кип}$  способствует возникновению все новых очагов кипения, интенсивность движения частиц в слое возрастает, повышается равномерность кипения [8].

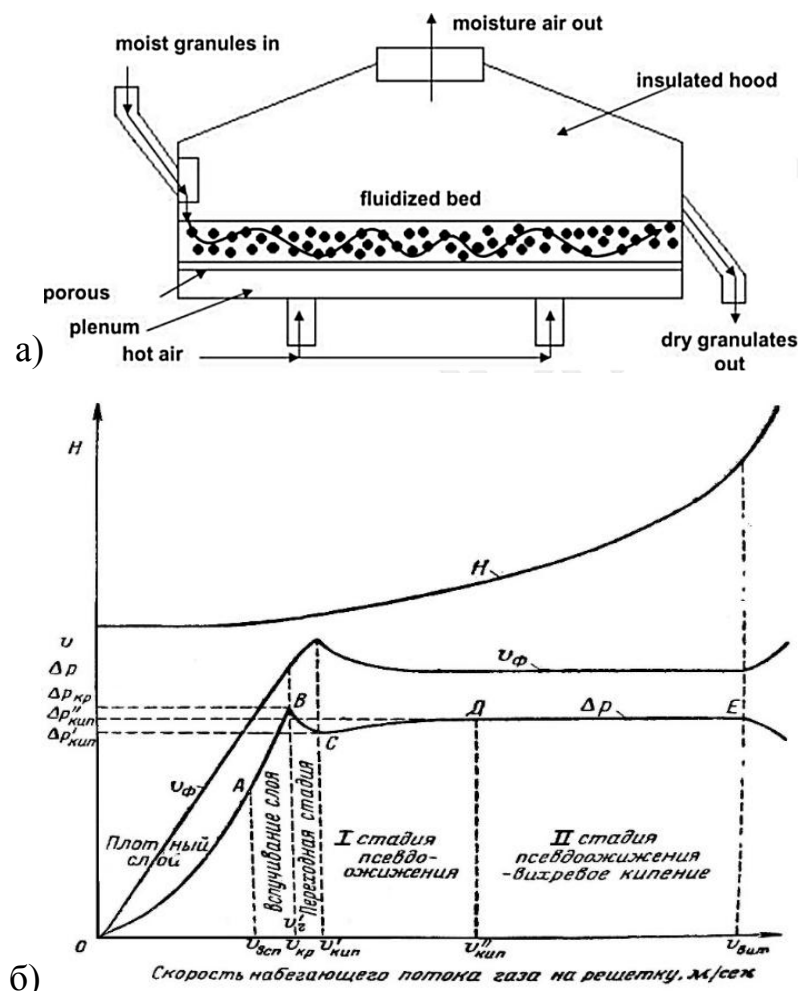


Рис. 2. – Сушилка с кипящим слоем: а) принципиальная схема, б) графическая характеристика процесса образования кипящего слоя ( $\Delta P$  - сопротивление слоя;  $u_\tau$  — скорость газа в слое;  $H$  — высота слоя).

### Математическая модель сушилки с кипящим слоем

Среда разработки OmegaLand обладает существенным разнообразием типовых модулей технологических единиц. Ввиду отсутствия в стандартных библиотеках модуля сушилки с кипящим слоем, данный модуль был разработан отдельно.

При составлении модели были приняты следующие допущения. Подача горячего воздуха в аппарат осуществляется снизу кросс-секционно, при этом расход теплоносителя и подвод тепла через все секции принимается одинаковым. Количество загружаемого гранулята в рамках данной модели варьируется в диапазоне 100-1000 кг [10-11]. Порции загружаемого гранулята одинаковы, вариация объема и исходной влажности материала на этапе автономной разработки модуля отсутствует. Температура и расход теплоносителя на линии подачи в аппарат приняты постоянными. При включении модуля сушилки в общую схему значения температуры теплоносителя экспортируются от соответствующих элементов. Скорость испарения жидкости из осушаемого материала принимается постоянной ввиду небольшого объема загрузки аппарата, зависимость текущей влажности материала от количества подводимого тепла принимается линейной. Тепловая инерционность материала и тепловые процессы, связанные с нагреванием стенок аппарата, не учитываются. В однофазной модели псевдооживленный слой рассматривается как последовательный. Предполагается, что частицы в слое идеально перемешаны.

Для математического описания сушильного аппарата, достаточного для создания виртуального модуля в OmegaLand, реализованы уравнения изменения во времени температуры внутри аппарата, текущего влагосодержания, количества испаренной влаги. Для оценки количества подведенного тепла в системе реализован контроль расхода и температуры теплоносителя на линии его подачи в сушилку.

---

Уравнение теплопередачи между отдельной частицей и газовой фазой:

$$q = h_p A_p (T_p - T_g), \quad (1)$$

где  $q$  - скорость теплопередачи (Вт);  $h_p$  - коэффициент теплопередачи (Вт / (м<sup>2</sup>К));  $A_p$  - площадь поверхности отдельной частицы (м<sup>2</sup>);  $T_p$  - температура частицы (К);  $T_g$  - температура газа (К)

Баланс влажности может быть выражен посредством выражения:

$$-M_s \frac{d\bar{X}}{dt} = G_g (Y_{out} - Y_{in}), \quad (2)$$

где  $M_s$  - массовая задержка сухого твердого вещества в слое (кг);  $\bar{X}$  - средняя влажность (кг/кг);  $G_g$  - массовый расход сухого воздуха (кг/с);  $Y$  - влажность воздуха (кг (водяной пар)/кг (сухой воздух))

Энергетический баланс:

$$M_s c_{ps} \frac{dT}{dt} = G_g (c_g + Y_{in} c_v) (T_{in} - T_{out}) - G_g (Y_{out} - Y_{in}) \lambda, \quad (3)$$

где  $c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении (кДж/кг К);  $\lambda$  - скрытая теплота испарения (кДж/кг) Подстрочный индекс  $s$  обозначает влажное твердое вещество,  $g$  обозначает сухой воздух, а  $v$  обозначает водяной пар. Уравнение 3 не учитывает ощутимую теплоту воды в твердых телах.

В простой двухфазной модели сушки в кипящем слое псевдооживленный слой состоит из пузырьковой и эмульсионной фаз. Пузырьковая фаза не содержит частиц или же частицы широко диспергированы. Эта модель предполагает, что весь газ, превышающий минимальную скорость псевдооживления, проходит через слой в виде пузырьков, в то время как эмульсионная фаза остается неизменной при минимальных условиях псевдооживления. Баланс массы жидкости в пузырьковой фазе описывается следующим уравнением:

$$\rho_g \varepsilon_{bb} \frac{dY_{bb}}{dt} + \rho_g \frac{V_{g,bb}}{V_b t} (Y_{bb} - Y_{in}) = \frac{6K_c \rho_g \varepsilon_{bb}}{d_{bb}} (Y_d - Y_{bb}), \quad (4)$$

где индексы  $_{bb}$  и  $_d$  обозначают пузырьковую и плотную фазу соответственно,  $V_{g,bb}/V_b$  - скорость потока газа в пузырьковой фазе на единицу объема слоя.  $K_c$  - коэффициент массообмена через границу пузырька.

Баланс массы жидкости в межзельном газе в плотной фазе:

$$\frac{6K_c \rho_g \varepsilon_{bb}}{d_{bb}} (Y_d - Y_{bb}) - \rho_g \frac{V_{g,bb}}{V_b t} (Y_{bb} - Y_{in}) + \dot{m} = \rho_g \varepsilon_{mf} (1 - \varepsilon_{bb}) \frac{dY_d}{dt}, \quad (5)$$

Баланс массы жидкости в частицах плотной фазы:

$$\dot{m} = -\rho_p (1 - \varepsilon_{mf}) (1 - \varepsilon_{bb}) \frac{d\bar{X}}{dt} \quad (6)$$

Связанный баланс массы и энергии в плотной фазе, состоящей из частиц и газовых фаз внедрения, может быть задан в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \rho_p (1 - \varepsilon_{mf}) (1 - \varepsilon_{bb}) (c_{ps} - c_{pt} \bar{X}) \frac{dT_p}{dt} = \\ & = \rho_g \frac{V_{g,d}}{V_b t} (c_{pg} - Y_{in} c_{pv}) (T_{g,in} - T_p) - \\ & - \Delta H_{evap} x \left[ \rho_g \frac{V_{g,d}}{V_b t} (Y_d - Y_{in}) - \frac{6K_c \rho_g \varepsilon_{bb}}{d_{bb}} (Y_{bb} - Y_d) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь влажность плотной и пузырьковой фаз,  $Y_d$ ,  $Y_{bb}$ ; энтальпия испарения,  $\Delta H_{evap}$ ; диаметр пузырька,  $d_{bb}$ ; и коэффициент массообмена границы пузырька. Это уравнение выражает изменение температуры частиц в плотной фазе в терминах среднего содержания влаги  $X$ . Из (7) возможно определить температуру твердых частиц при разных временах сушки [11].

### Разработка эмулятора

Практическая часть разработки объекта модели выполнена в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio на языке программирования C++. В библиотеке объектов OmegaLand, файл модели (рис. 3) можно разделить на три части:

1. Блок описания символов, где происходит объявление различных переменных, которые используются для реализации логики работы модели

2. Блок процедуры инициализации, в котором указывается имя функции инициализации, создаваемой в Microsoft Visual Studio.
3. Блок процедуры исполнения, где прописывается имя функции исполнения, также создаваемой в Microsoft Visual Studio.

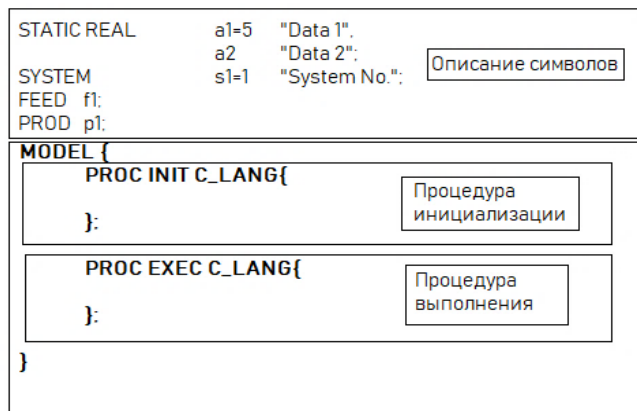


Рис. 3. – Структура файла создаваемых моделей.

Для разработки модели сушилки в папке проекта Visual Modeler создается раздел «userlib» в котором формируется файл модели с расширением «.blk» [4, 5], где содержатся все необходимые переменные создаваемой модели, от параметров габарита до точек подключения входа и выхода из аппарата. Основными параметрами настройки модели являются FEED – вход в аппарат, PROD – выход из аппарата, COMP – переменные состава компонентов, габаритные параметры (DD – диаметр, LD – длина).

В блоке MODEL описывается логика работы модели. В Visual modeler определены специальные блоки для инициализации модели (PROC INIT C\_LANG) и выполнения логики модели (PROC EXEC C\_LANG). Перед командой (return 1;) можно вызвать свои собственные функции, например, init\_fbd, которые будут реализованы в Microsoft Visual Studio. Для добавления новой модели в Visual modeler ее необходимо зарегистрировать и сформировать для нее схематичный вид.

Уравнение материального баланса задается выражением [5]:

$$G_1 = G_2 \cdot \frac{100 - W_2}{100 - W_1} \quad (7)$$

где  $G_1$  – количество влажного материала поступающая на сушку;  $G_2$  – количество высушенного материала;  $W_1$  – начальная влажность материала;  $W_2$  – конечная влажность материала.

Расчет материального баланса в аппарате, представленный на фрагменте кода (рис.4), реализован по методу Эйлера:

$$f(n) = f(n-1) + F(n-1) * dT \quad (8)$$

```
Zl = Zv = 0.0;
for (i = 0; i < nc; i++){
    zl[i] += (Ff1*rlf1*xf1[i] + Ff2*rlf2*xf2[i] - Fp1*rlp1*xp1[i] - Fp2*rlp2*xp2[i] - ftre[i] + ftrc[i]) * step;
    zv[i] += (Ff1 * rvf1 * yf1[i] + Ff2 * rvf2 * yf2[i] - Fp1*rvp1*yp1[i] - Fp2*rvp2*yp2[i] + ftre[i] - ftrc[i]) * step;
    if (zl[i] < 0.0)
        zl[i] = 0.0;
    if (zv[i] < 0.0)
        zv[i] = 0.0;
    Zl += zl[i];
    Zv += zv[i];
}
//Zl: Liquid phase holdup
//Zv: Vapor phase holdup
```

Рис. 4. – Фрагмент кода расчета материального баланса

После завершения описания логики сушильного аппарата, происходит сборка проекта. На выходе проекта формируется статическая библиотека «mdlusr.lib», где реализована логика работы сушилки в виде функции. Эти функции теперь могут быть использованы средой моделирования OmegaLand для сборки и исполнения схемы. После запуска исполнения проекта, реализуется настройка отображения переменных, соответствующих параметрам различных единиц оборудования и состояний потоков.

## Результаты

Основным результатом настоящей работы является функционирующий модуль для эмульсии процесса осушки поливинилхлорида (ПВХ), разработанный в среде моделирования OmegaLand. Технологическая схема эмульгатора в режиме исполнения представлена на рисунке 5. В итоговой схеме ПВХ с фиксированной влажностью (в демонстрируемом случае - 20%) подается на вход через элемент «VL c101». Пропорционально интегрально дифференциальным (ПИД) регулятором «i102» поддерживается нужные



значения расхода влажного материала [6]. Далее ПВХ попадает в сушилку с кипящим слоем «u102». На другой вход сушилки подается нагретый с помощью печи «с1090» воздух с температурой 235 °С. ПИД регулятор «TIC001» настроен на удержание оптимальной температуры горячего воздуха из теплообменника, которая достигается регулированием расхода горячего в печи. Отработанный воздух попадает в циклон «u101», очищается от унесенной пыли и выбрасывается в атмосферу. ПИД регулятор «AIC001» настроен для поддержания соотношения воздух/топливо в печи «с1090», ПИД регулятор «i101» реагирует на определенный уровень в сушилке, ПИД регулятор «i104» настроен для поддержания нужных значений расхода воздуха на холодную сторону теплообменника. После осушки, ПВХ выгружается из выхода № 2. Конечную влажность можно увидеть по значению переменной XL(1).

Тестирование проекта в режиме эмуляции показало удовлетворительную сходимость с моделируемым объектом. Для оценки качества функционирования сушилки были применены данные, представленные в работах [10-12].

### **Заключение**

Результирующий продукт представляет собой функциональный модуль сушилки с кипящим верхним слоем для среды Omegaland, адекватный реальным условиям и пригодный для использования в схемах технологических тренажеров. Разработка пользовательских моделей, не представленных в стандартной библиотеке среды моделирования OmegaLand, открывает большие возможности в проектировании, настройке и оценке эффективности режимов работы разнообразных технологических объектов.

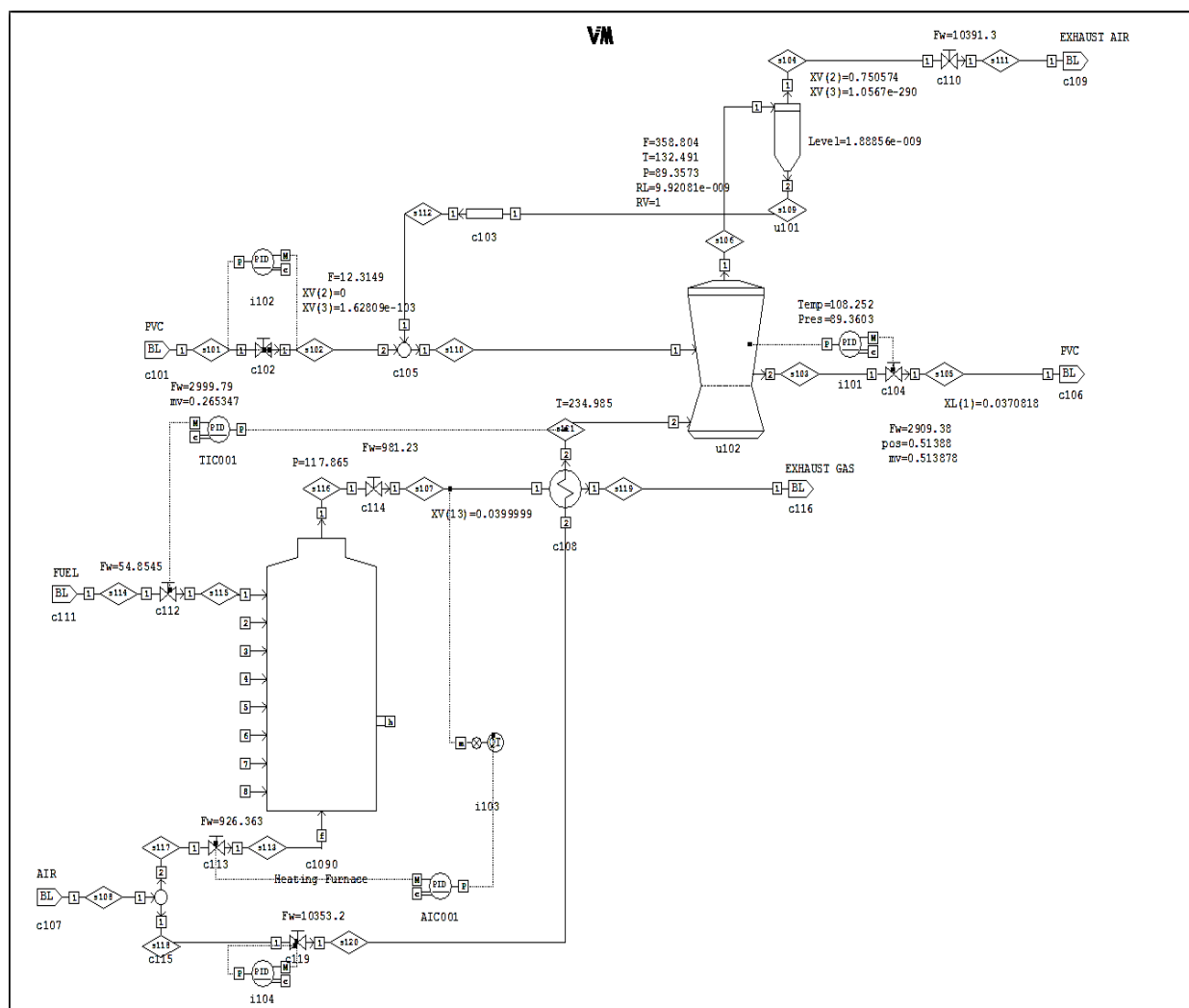


Рис. 5. – Технологическая схема осушки ПВХ в режиме эмульсии

## Литература

1. Staroverova N. A., Shustrova M. L., Satdarov M. R. Development of a Cyber-Physical System for the Specialized On-Track Machine Operators Training // Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 260. - pp. 315-325. – DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-32648-7\_25.

2. Staroverova N. A., Shustrova M. L., Zatsarinnaya Yu. N. The development of rolling-stock virtual simulator Overview of the International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH - 2019 // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399(1). – P. 44025. – DOI: doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044025

3. Староверова Н. А., Зацаринная Ю. Н., Шубина С. К. Использование интегрированной среды динамического моделирования OmegaLand для исследования характеристик регуляторов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. Т. 18. № 1. - С. 63-68. – DOI: doi.org/10.14529/ctcr180107.

4. Fukano G., Yokoyama K., Yahata Y. Mirror plant. On-line Plant Simulator and its Applications // Yokogawa Tech. Rep. Engl. Ed. 2013. V. 56. №. 1. – pp. 11-14.

5. Kamada Y. Recent Trends of Dynamic Simulator Applications and Prospects for OmegaLand. // Yokogawa Technical Report English Edition, 2013. V. 56. №. 1. URL: web-material3.yokogawa.com/rd-te-r05601-001.pdf

6. Соловьёв К. А., Просочкина Т. Р. Сравнение технологий получения полимерного материала поливинилхлорида (пвх) // Внедрение передового опыта и практическое применение результатов инновационных исследований. 2021. – С. 27-30.

7. Пахомов А. Н., Васенина С.В., Бирюкова И.А., Комбарова Е.Ю, Позднышева И.Г. Некоторые особенности моделирования сушки с кипящим слоем инертных тел // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3819

8. Шкурин Ю. М. Сушка порошка полиэтилена от органического растворителя // Высокие технологии в современной науке и технике. 2015. - С. 215-218.

9. Липин А. А., Липин А. Г., Кириллов Д. В. Моделирование процесса сушки и демономеризации полиамида в аппарате с кипящим слоем // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. №. 2. – С.85-88.

10. Русакова Г. Г., Лебедь Н. И., Тронев С. В., Парахневич Е. Д. Математическое моделирование автоматизированной сушилки с кипящим слоем // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. №. 3. – С. 82-85.

11. Пахомов А. Н., Скрипникова, С.Г., Сироткин, А.О., Загребнев Р.С. Исследование характера кипящего слоя в сушилке с инертными телами //Инженерный вестник Дона. 2016. №. 1. URL [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3547](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3547)

12. Алексанян И. Ю., Титова Л. М., Нугманов А. Х. Моделирование процесса сушки дисперсного материала в кипящем слое //Техника и технология пищевых производств. 2014. №. 3 (34). – С. 96-102.

### References

1. Staroverova, N. A., Shustrova, M. L., Satdarov M. R. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. v. 260. pp. 315-325. DOI: [doi.org/10.1007/978-3-030-32648-7\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32648-7_25).
2. Staroverova N. A., Shustrova M. L, Zatsarinnaya Yu. N. Overview of the International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering APITECH 2019 Journal of Physics: Conference Series. 2019. v. 1399(1). p. 44025. DOI: [doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044025](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044025)
3. Staroverova N. A., Zacarinnaya YU. N., SHubina S. K. Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika. 2018. v. 18. № 1. pp. 63-68. DOI: [doi.org/10.14529/ctcr180107](https://doi.org/10.14529/ctcr180107).
4. Fukano G., Yokoyama K., Yahata Y. Yokogawa Tech. Rep. Engl. Ed. 2013. v. 56. №. 1. pp. 11-14.
5. Kamada Y. Yokogawa Technical Report English Edition, 2013. v. 56. №.1. URL: [web-material3.yokogawa.com/rd-te-r05601-001.pdf](http://web-material3.yokogawa.com/rd-te-r05601-001.pdf)



6. Solov'yov K. A., Prosochkina T. R. Vnedrenie peredovogo opyta i prakticheskoe primeneniye rezul'tatov innovacionnyh issledovaniy. 2021. pp. 27-30.
7. Pahomov A. N., Vasenina S.V., Biryukova I.A., Kombarova E.Y., Pozdnysheva I.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №. 4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3819](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3819)
8. SHkurin YU. M. Vysokie tekhnologii v sovremennoj nauke i tekhnike. 2015. pp. 215-218.
9. Lipin A. A., Lipin A. G., Kirillov D. V. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2012. v. 55. №. 2. pp. 85-88.
10. Rusakova G. G., Lebed' N. I., Tronev S. V., Parakhnevich E. D. Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2020. №. 3. pp. 82-85.
11. Pahomov A. N., Skripnikova S.G., Sirotkin A.O., Zagrebnev R.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. v. 40. №. 1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3547](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3547)
12. Aleksanyan I. YU., Titova L. M., Nugmanov A. H.H. Tekhnika i tekhnologiya pishchevyh proizvodstv. 2014. №. 3 (34). pp. 96-102.