

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО В КОРПУСЕ И СИСТЕМЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ РЕКОМБИНАЦИИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВИР-2М ПРИ ПОДРЫВЕ ГРЕМУЧЕГО ГАЗА

Шуркаев Александр Васильевич (otd4@expd.vniief.ru), Пикулев Алексей Александрович, Юнин Денис Анатольевич, Авдеев Артём Дмитриевич, Дягель Антон Русланович, Табаков Сергей Олегович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Представлена зависимость скачка давления, возникающего при сжигании гремучего газа в корпусе активной зоны модернизированного растворного реактора ВИР-2М от давления гремучего газа перед сжиганием. Для энерговыделения в АЗ реактора ВИР-3, равного 152 МДж, и начальном давлении воздуха в корпусе реактора $0,9 \cdot 10^5$ Па при сжигании гремучего газа скачок давления не превысит $80 \cdot 10^5$ Па. При сгорании гремучего в элементах СКР для начального давления смеси $0,9 \cdot 10^5$ Па объемной доли водорода 10 % и температуры 300 К максимальное давление не превысит $6 \cdot 10^5$ Па.

Ключевые слова: взрывобезопасность, гремучий газ, давление при сжигании, радиолитический газ, радиолиз воды

CALCULATION OF MAXIMAL PRESSURE OCCURRING IN THE VESSEL AND CATALYTIC RECOMBINATION SYSTEM OF MODIFIED RESEARCH NUCLEAR REACTOR VIR-2M AT DETONATING GAS EXPLOSION

Shurkaev Aleksandr Vasilievich (otd4@expd.vniief.ru), Pikulev Aleksey Aleksandrovich, Yudin Denis Anatolievich, Avdeev Artem Dmitrievich, Dyagel Anton Ruslanovich, Tabakov Sergey Olegovich

FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov Nizhny Novgorod region

The dependence between the pressure jump occurring at detonating gas burning in the core vessel of modified solution-type reactor VIR-2M and the detonating gas before burning. For energy release in the VIR-3 reactor core equal to 152MJ and initial air pressure in the reactor vessel equal to $0.9 \cdot 10^5$ Pa at detonating gas burning the pressure jump will not be higher than $80 \cdot 10^5$ Pa. At detonating gas combustion in the catalytic recombination system (SKR) elements for the initial pressure of mixture $0.9 \cdot 10^5$ Pa, volume fraction of hydrogen 10 % and temperature 300K the maximal pressure will not exceed $6 \cdot 10^5$ Pa.

Key words: explosion safety, detonating gas, burning pressure, radiolytic gas, water radiolysis

Целью данной работы является расчет скачка давления при сжигании гремучего газа (ГГ) в зависимости от начальных параметров газовой среды и энерговыделения в корпусе модернизированного импульсного ядерного реактора (ИЯР) ВИР-2М (с новым корпусом активной зоны). Актуальность работы связана прежде всего с прогнозированием (и предотвращением) аварий, связанных с самовоспла-

менением водородосодержащей смеси при превышении концентрационных пределов взрывобезопасности. В рамках данной работы был произведен расчет динамического давления, возникающего в корпусе реактора ВИР-2М при сжигании радиолитического газа, выделившегося в надтопливное пространство после генерации импульса делений.

В установках типа ВИР, образование ГГ носит ярко выраженный характер. Продукты деления, обладающие огромным ионизационным потенциалом, отдают большую часть энергии молекулам воды. [1]. Проведенные исследования для водного раствора уранилсульфата с 90 % обогащением по ^{235}U показали, что энергия деления составляет более 99,5 % от общей поглощенной в топливном растворе энергии [2]. Образование ГГ по ряду причин является негативным процессом. Во-первых, ГГ скапливается в надтопливном пространстве установки при ее работе, что создает опасность самоподрыва при работе реактора на мощности с возможной разгерметизацией корпуса и выходом газообразных продуктов деления в помещения реакторных залов. Воспламенение ГГ ведет к кратковременному скачку давления в корпусе установки. Так как корпус ВИР-2М рассчитан на внутреннее давление 20 МПа, максимальное давление в корпусе (до сжигания гремучего газа) ограничено значением в $4 \cdot 10^5$ Па (из которых $(0,7-0,9) \cdot 10^5$ Па – давление воздуха, а остальное – гремучий газ). Данное ограничение связано с тем, что согласно консервативным оценкам, при сжигании ГГ давление в корпусе реактора в этом случае не превысит 16 МПа, что обеспечивает достаточный запас по прочности корпуса.

Для обеспечения безопасности работ при использовании СКР необходимо поддерживать уровень содержания водорода в надтопливном пространстве и контуре СКР меньше нижнего предела воспламенения. Это связано с опасностью повреждений элементов СКР и выходом газообразных радиоактивных продуктов деления в реакторные залы при нарушении герметичности.

Используемые приближения

При расчетном определении максимального давления и температуры, возникающих в корпусе реактора и газовом контуре СКР при сжигании радиолитического газа, будем пренебрегать возможным образованием ударных волн и излучением (тепловым и нетепловым) газовой смеси. Газовую смесь перед сжиганием считаем идеально перемешанной, так что значения всех термодинамических параметров не зависят от координат. Корпус реактора и корпус СКР считаем абсолютно жесткими, так что сгорание происходит при постоянном объеме. Теплообменом газовой смеси со стенками и поверхностью топливного раствора пренебрегаем, то есть газовую смесь считаем теплоизолированной. Таким образом, с точки зрения термодинамики процесс сжигания радиолитического газа будет характеризоваться двумя наборами термодинамических параметров (концентрация, давление и температура) – до и после сжигания. Принимаем, что при радиолитическом распаде воды ГГ образуется в стехиометрическом соотношении молекулярного водорода и кислорода (1:1). При проведении

расчетов полагаем, что смесь газов представляет собой идеальный газ. Также не будем учитывать слипания и кластеризации молекул воды перегретой смеси при больших значениях температуры и давления. Считаем, что процесс сгорания гремучего газа происходит мгновенно. Сжигание ГГ считаем полным. Данные приближения применимы в нашем случае, потому что ставится задача определения максимального давления при сжигании ГГ в корпусе установки (консервативное приближение).

Исходные данные для расчетов

В расчетах в качестве V была использована величина объема надтопливного пространства корпуса активной зоны (АЗ) реактора ВИР-3: $V = 0$.

Значение θ (объем радиолитического газа, образовавшегося на единицу энерговыделения, приведенный к нормальным условиям) было взято для топливного раствора действующего реактора ВИР-2М (водный раствор уранил-сульфата с концентрацией ~ 70 г/л [1]): $\theta = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Дж}$.

Примечание – В области концентраций уранилсульфата от 60 до 80 г/л выход радиолитического газа практически не меняется и составляет от 4,47 до 4,53 л/МДж [1].

Расчеты проводились для следующих значений начального давления и температуры воздуха в надтопливном пространстве:

$$P_0 = 0,7, 0,8, 0,9 \text{ и } 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T = 293, 313, 333 \text{ и } 353 \text{ К}.$$

Примечание – Здесь и далее под давлением P_0 следует понимать давление сухого воздуха.

В качестве максимального энерговыделения в импульсе было использовано значение $Q = 152 \text{ МДж}$. При расчетах скачка давления при сжигании смеси воздух - пары воды – радиолитический газ использовали значения давления насыщения водяного пара, представленные в справочнике [3].

Удельную теплоту сгорания водорода принимали равной (максимальное значение теплоты сгорания):

$$q = 1,4 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad [4]$$

Скачок давления при сжигании водородно – кислородной смеси в стехиометрическом соотношении 2:1 (гремучий газ)

В качестве первого приближения рассмотрим сжигание чистого ГГ без добавок воздуха и паров воды.

Пусть энерговыделение в АЗ реактора равно Q . Полагаем, что на мегаджоуль выделившейся энергии образуется 4,5 л ГГ при нормальных условиях в стехиометрическом соотношении ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$). Газ скапливается в надтопливном пространстве корпуса объема V .

Давление радиолитического газа P можно выразить простым соотношением:

$$P = \frac{\Delta V}{V} P_{\text{атм}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; $\Delta V = Q\theta$ – объем выделившегося ГГ при нормальных условиях.

Тогда:

$$P = \frac{Q\theta}{V} P_{\text{атм}}. \quad (2)$$

Давление гремучего газа будет складываться из парциальных давлений составляющих. Тогда число молекул водорода находится как:

$$N_{\text{H}_2} = \frac{2PV}{3kT}. \quad (3)$$

Отсюда масса водорода, соответствующая давлению P , составит:

$$m_{\text{H}_2} = \frac{2PVM_{\text{H}_2}}{3kTN_A}, \quad (4)$$

где $M_{\text{H}_2} = 2 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ – молярная масса молекулы водорода;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана; $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{моль}^{-1}$ – число Авогадро.

Энергия, выделившаяся при сжигании водорода данной массы, составит:

$$E = qm_{\text{H}_2}, \quad (5)$$

где q – энергия, выделяющаяся при сгорании единицы массы водорода с образованием пара при температуре, соответствующей температуре водородно-воздушной смеси до сжигания [4].

Предположим, что все молекулы водорода вступили в реакцию с кислородом. Тогда число молекул воды будет равно числу молекул водорода:

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2PV}{3kT}. \quad (6)$$

Так как газы в надтопливном пространстве заключены в жесткий герметичный корпус, то примем, что при сжигании ГГ перегретая смесь не совершает работы. Считаем, что вся энергия сжигания ГГ идет на повышение внутренней энергии газов в надтопливном пространстве. Для нахождения максимальной температуры в надтопливном пространстве при сжигании ГГ рассмотрим внутреннюю энергию системы перед сжиганием газа и после. Внутренняя энергия ГГ до сжигания будет определяться как сумма внутренних энергий водорода и кислорода:

$$U_0 = \frac{i_{\text{H}_2}}{2} N_{\text{H}_2} kT + \frac{i_{\text{O}_2}}{2} N_{\text{O}_2} kT, \quad (7)$$

где i_{H_2} – число степеней свободы молекулы водорода; i_{O_2} – число степеней свободы молекулы кислорода; N_{O_2} – число молекул кислорода в надтопливном пространстве (равно половине числа молекул водорода).

Непосредственно в самом конце процесса сжигания ГГ внутренняя энергия перегретого пара в надтопливном пространстве будет:

$$U = U_0 + Q_{\text{подв}} = \frac{i_{\text{H}_2\text{O}}}{2} N_{\text{H}_2\text{O}} kT_{\text{max}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{подв}} = E = qm_{\text{H}_2} = \frac{qN_{\text{H}_2}M_{\text{H}_2}}{N_A}$ – подведенная

к системе энергия, равная энергии сжигания водорода; $i_{\text{H}_2\text{O}}$ – число степеней свободы молекулы воды; T_{max} – максимальная температура пара при сжигании ГГ.

Тогда (8) примет вид:

$$\frac{i_{\text{H}_2}}{2} N_{\text{H}_2} kT + \frac{i_{\text{O}_2}}{2} \frac{N_{\text{H}_2}}{2} kT + \frac{qN_{\text{H}_2}M_{\text{H}_2}}{N_A} = \frac{i_{\text{H}_2\text{O}}}{2} N_{\text{H}_2} kT_{\text{max}}. \quad (9)$$

Откуда можно выразить максимальную температуру пара, образовавшегося после сгорания ГГ:

$$T_{\text{max}} = \left(\frac{i_{\text{H}_2}}{i_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{i_{\text{O}_2}}{2i_{\text{H}_2\text{O}}} \right) T + \frac{2qM_{\text{H}_2}}{i_{\text{H}_2\text{O}}kN_A}. \quad (10)$$

Считаем, что двухатомные молекулы имеют 5 степеней свободы ($i_{\text{H}_2} = i_{\text{O}_2} = 5$), а трехатомные – 6 ($i_{\text{H}_2\text{O}} = 6$).

Из (10) видно, что температура не зависит от давления ГГ перед сжиганием, а зависит только от начальной температуры T . Так при температуре ГГ $T = 293 \text{ К}$, максимальная температура пара будет $T_{\text{max}} = 1,15 \cdot 10^4 \text{ К}$.

Давление, соответствующее данной температуре, будет находиться из выражения:

$$P_{\text{max}} = n_{\text{H}_2\text{O}} kT_{\text{max}}, \quad (11)$$

где $n_{\text{H}_2\text{O}}$ – концентрация молекул воды (пара) в надтопливном пространстве после сжигания ГГ.

Для оценки давления ГГ перед сжиганием можно воспользоваться выражением, аналогичным (11):

$$P = (n_{\text{H}_2} + n_{\text{O}_2}) kT = \frac{3}{2} n_{\text{H}_2} kT. \quad (12)$$

С помощью соотношений (11) и (12) можно получить зависимость $P_{\text{max}}(P)$ при сжигании чистого ГГ.

В соответствии с программой физического пуска ИЯУ ВИР-2 (предшественника реактора ВИР-2М), были проведены измерения импульсного давления, возникающего при подрыве ГГ, методом разрыва калиброванных мембран. Динамические нагрузки в пустом корпусе ВИР-2 объемом 250 л (что практически совпадает с объемом надтопливного пространства корпуса АЗ ИЯР ВИР-3) создавались путем подрыва в нем ГГ (в стехиометрическом соотношении). При измерении импульсных значений давления определялось предельное давление сжатой газовой смеси, приведшее к разрыву калиброванной мембраны. На рис. 1 показаны расчетные зависимости $P_{\text{max}}(P)$ (вычисленные по соотношениям (11), (12)) и экспериментальные точки.

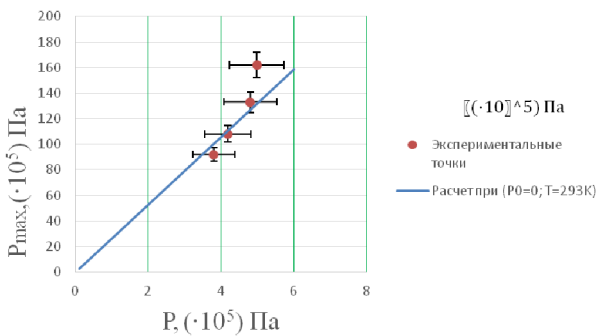


Рис. 1. График зависимости давления при сжигании чистого ГГ от давления ГГ перед сжиганием в надтопливном пространстве ИЯР ВИР-3 и результаты эксперимента для ИЯР ВИР-2

Совпадение результатов расчета и эксперимента можно признать удовлетворительным. «Выброс» для начального давления ГГ $5 \cdot 10^5$ Па не имеет принципиального значения, так как на установке ВИР-2М и ее модификации ВИР-3 максимальное давление газов в корпусе не должно превышать $4 \cdot 10^5$ Па. Данное значение было выбрано в связи с ограничением максимальной динамической нагрузки на корпус реактора во время сжигания ГГ.

Скачок давления при сжигании смеси воздух – пары воды – радиолитический газ

Обратимся к задаче определения скачка давления при подрыве ГГ при наличии в исходной смеси воздуха и паров воды. Ниже (если это не оговорено специально) будем считать, что водяной пар находится в состоянии насыщения.

С учетом воздуха и насыщенного пара уравнение (3) переписывается в виде:

$$U_0 = \frac{i_{H_2} N_{H_2} kT}{2} + \frac{i_{O_2} N_{O_2} kT}{2} + \frac{i_{air} N_{air} kT}{2} + \frac{i_{H_2O} N_{steam} kT}{2} \quad (13)$$

где N_{steam} – число молекул воды (пара) в надтопливном пространстве до сжигания гремучего газа, N_{air} – число молекул воздуха в надтопливном пространстве.

После сгорания ГГ внутренняя энергия перегретых газов в надтопливном пространстве составит:

$$U = U_0 + Q_{подв} = \left(\frac{i_{H_2O}}{2} N_{steam} + \frac{i_{H_2O}}{2} N_{H_2O} + \frac{i_{air}}{2} \right) kT_{max} \quad (14)$$

Отсюда получаем выражение для максимальной температуры:

$$T_{max} = \frac{\frac{i_{H_2} N_{H_2} kT}{2} + \frac{i_{O_2} N_{O_2} kT}{2} + \frac{i_{air} N_{air} kT}{2} + \frac{i_{H_2O} N_{steam} kT}{2} + \frac{q N_{H_2} M_{H_2}}{N_A}}{\left(\frac{i_{H_2O}}{2} N_{steam} + \frac{i_{H_2O}}{2} N_{H_2O} + \frac{i_{air}}{2} N_{air} \right) k} \quad (15)$$

Максимальное давление в надтопливном пространстве находится из следующего соотношения:

$$P_{max} = (n_{H_2O} + n_{air} + n_{steam}) k T_{max} \quad (16)$$

где n_{steam} – концентрация молекул воды (пара) в надтопливном пространстве до сжигания ГГ. Оценку давления ГГ перед сжиганием можно произвести с помощью (12). Для получения зависимости $P_{max}(Q)$ выразим из (1) энерговыделение:

$$Q = \frac{PV}{\theta P_{атм}} \quad (17)$$

Далее можно пересчитать значения Q для ранее рассчитанных значений $P_{max}(P)$, таким образом, получив для каждого Q значение P_{max} . На рис. 2 представлены зависимости $P_{max}(Q)$ при фиксированном значении начального давления воздуха в надтопливном пространстве ($P_0 = 0,9 \cdot 10^5$ Па) и различных температурах: $T = 293, 313, 333$ и 353 К. На рис. 3 представлены зависимости $P_{max}(P)$ при начальной температуре 353 К и давлениях воздуха в надтопливном пространстве ($P_0 = 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 \cdot 10^5$ Па). На рис. 4. показаны зависимости $P_{max}(P)$ при фиксированном значении начального давления воздуха $P_0 = 0,9 \cdot 10^5$ Па и значениях начальных температур $T = 293, 313, 333$ и 353 К.

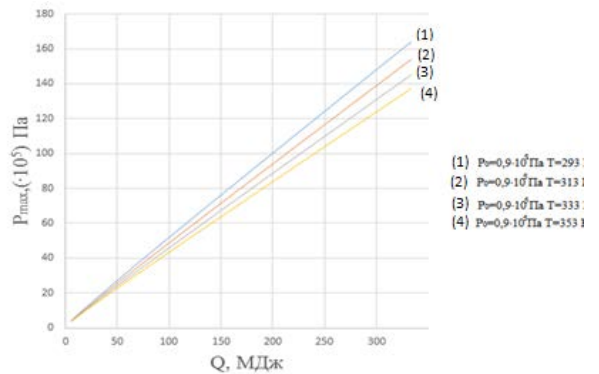


Рис. 2. Графики зависимости давления при сжигании ГГ в надтопливном пространстве ИЯР ВИР-3 от энерговыделения в АЗ (при фиксированном начальном давлении воздуха $0,9 \cdot 10^5$ Па для различных температур смеси перед сжиганием, с учетом насыщенного пара в надтопливном пространстве)

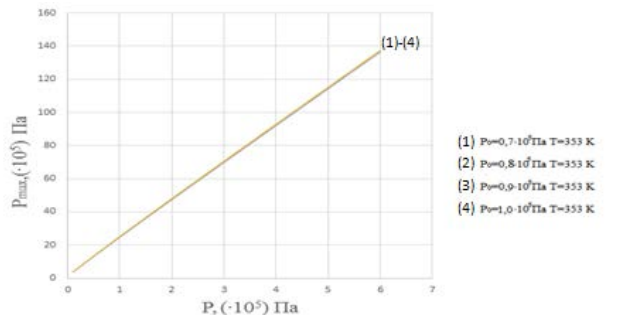


Рис. 3. Графики зависимости давления при сжигании ГГ в надтопливном пространстве ИЯР ВИР-3 от начального давления гремучего газа (при различных давлениях воздуха и температуре газов перед сжиганием $T = 353$ К, с учетом насыщенного пара в надтопливном пространстве)

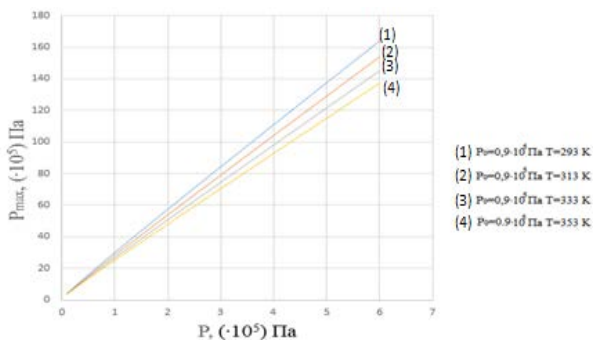


Рис. 4. Графики зависимости давления при сжигании ГГ в надтопливном пространстве ИЯР ВИР-3 от начального давления гремучего газа перед сжиганием (при начальном давлении воздуха $0,9 \cdot 10^5$ Па и различных начальных температурах смеси, с учетом насыщенного пара в надтопливном пространстве)

Из рис. 2 следует, что при повышении начальной температуры воздуха, 100 % влажности и фиксированном начальном давлении ($0,9 \cdot 10^5$ Па), происходит снижение давления в корпусе АЗ при сжигании ГГ. Это связано с уменьшением концентрации парогазовой смеси при увеличении температуры. Как видно из рис. 2, для максимального энерговыделения в АЗ реактора ВИР-3, равного 152 МДж, и начальном давлении воздуха в корпусе реактора $0,9 \cdot 10^5$ Па, при сжигании ГГ скачок давления не превысит $8 \cdot 10^6$ Па. Из рис. 3 видно, что максимальное давление не сильно зависит от начального давления воздуха в надтопливном пространстве (в рассмотренном диапазоне), и графики практически совпадают друг с другом. Из рис. 4 следует, что при повышении начальной температуры воздуха 100 % влажности и фиксированном начальном давлении ($0,9 \cdot 10^5$ Па) происходит снижение давления в корпусе АЗ при сжигании ГГ. Это, как и для рис. 2 связано, с уменьшением концентрации парогазовой смеси при увеличении температуры.

Скачок давления при сжигании смеси воздух – радиолитический газ в СКР

Для обеспечения взрывобезопасности объемная доля водорода в контуре СКР и корпусе реактора не должна превосходить нижний предел взрывобезопасности – 4 %.

Дополнительно необходимо полностью исключить возможность возникновения детонации или квазидетонации, для чего объемная доля водорода (в том числе локальная) не должна превосходить 9 %. Контроль параметров смеси газов в контуре СКР предполагается осуществлять системой датчиков водорода, располагающихся на входе и выходе каталитического блока. На ИЯР ВИР-3 показания датчиков будут выводиться в систему управления и защиты установки, а на макете СКР – в систему управления макетом. В данном случае, если и возникнет воспламенение смеси газов, то оно вероятнее всего произойдет на нижнем (бедном) концентрационном пределе воспламенения водорода и будет

иницировано локальным перегревом каталитического элемента.

В данном подразделе, оценим максимально возможное динамическое давление при воспламенении смеси газов в блоке СКР при следующих условиях:

- относительное объемное содержание водорода в смеси от 0 до 15%,
- давление воздуха в контуре СКР $P_0 = 0,9 \cdot 10^5$ Па,
- температура смеси $T = 300; 500; 700$ К.

Газовая смесь при выходе из надтопливного пространства осушается в холодильнике. Таким образом, в блок СКР попадает ГГ с меньшей концентрацией пара чем концентрация насыщенного пара при 310 К. Исходя из этого, будем считать, что при 500 и 700 К концентрация пара в смеси ГГ с воздухом не превосходит концентрации насыщенного пара при 320 К. При температуре $T = 300$ К считаем, что пар находится в состоянии насыщения. Давление насыщенных паров при температурах $T = 300$ К и $T = 320$ составляют соответственно $P_{нас} = 0,038 \cdot 10^5$ Па и $P_{нас} = 0,101 \cdot 10^5$ Па [3].

Число молекул воздуха находим аналогично выражению в подразделе 1.5:

$$N_{atr} = \frac{P_{atr} V}{kT}, \quad (18)$$

где $V = 0,26$ м³ суммарный свободный объем в контуре СКР и надтопливном пространстве.

Число молекул водорода выражаем из числа молекул воздуха в смеси:

$$N_{H_2} = \omega N_{atr}, \quad (19)$$

где ω – доля водорода в смеси.

Так как водород и кислород находятся в стехиометрическом соотношении, то молекул кислорода будет в два раза меньше числа молекул водорода:

$$N_{O_2} = \frac{\omega N_{atr}}{2}. \quad (20)$$

Расчет максимального давления при сжигании ГГ будем производить как с паром, так и без него. Для этого воспользуемся выражениями (15) – (16). Данные выражения легко преобразовать для расчета сухой смеси ГГ с воздухом, исключив из выражения множители, содержащие индекс «steam».

На рис. 5 представлены результаты расчетов.

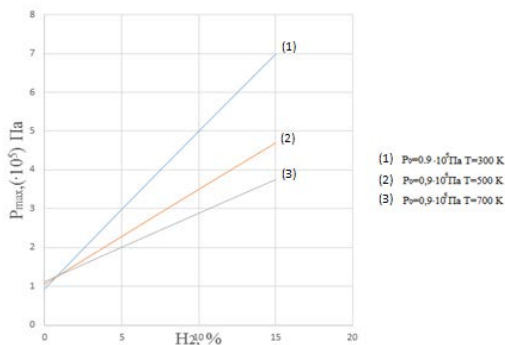


Рис. 5. Зависимость максимального давления при сгорании смеси ГГ + пар + воздух в блоке СКР от относительного объемного содержания водорода при постоянном давлении смеси $P_0 = 0,9 \cdot 10^5$ Па и температурах $T = 300; 500; 700$ К

В результате проведенной работы были сделаны следующие выводы:

– при повышении начальной температуры воздуха, 100 % влажности и фиксированном начальном давлении ($0,9 \cdot 10^5$ Па), происходит снижение давления в корпусе АЗ при сжигании ГГ. Это связано с уменьшением концентрации парогазовой смеси при увеличении температуры;

– для энерговыделения в АЗ реактора ВИР-3, равного 152 МДж, и начальном давлении воздуха в корпусе реактора $0,9 \cdot 10^5$ Па при сжигании ГГ скачок давления не превысит $80 \cdot 10^5$ Па;

– при сгорании ГГ в элементах СКР для начального давления смеси $0,9 \cdot 10^5$ Па, объемной доли водорода 10 % и температуры 300 К максимальное давление не превысит $6 \cdot 10^5$ Па.

1. Бяков В. М., Ничипоров Ф. Г. Радиоллиз воды в ядерных реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1990.

2. Бойл Д. У., Хоканадел К. Д. и др. Разложение воды осколками делящихся ядер // Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, состоявшейся в Женеве 8–20 августа 1955 г. 1958. Т. 7. С. 700–707.

3. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.

4. Википедия [Электронный ресурс]: свобод. энцикл.: [веб-сайт]. – Электрон.дан. – 2001. URL: http://ru.wikipedia.org/Горение_водорода (дата обращения: 17.10.2019).